

Ortesis de Mano Robótica

Robotic Hand Orthosis

Juan Diego Trujillo



Daniela Perdomo Trujillo



Juan Guillermo Gómez



Jhon Gerardo Vera



Mario Ricardo Arbulú



Cómo citar: Trujillo, J., Perdomo, D., Gómez, G., Vera, J. y Arbulú, M. (2022). Ortesis de Mano Robótica. Hashtag, (20), 30-48



Resumen

El siguiente artículo se enfoca en la selección y diseño de ortesis de la mano; un dispositivo médico utilizado para ayudar en la recuperación y rehabilitación de pacientes con lesiones o discapacidades en la mano. Para lograr una recuperación efectiva es esencial tener en cuenta la longitud de cada una de las falanges y los ángulos máximos de las articulaciones metacarpofalángica, digital y proximal interfalángica. Además, la selección del motor adecuado para la ortesis debe basarse en los torques dinámicos y estáticos necesarios para brindar el soporte y la movilidad requeridos. Este artículo proporciona información valiosa para los profesionales médicos y los pacientes que buscan mejorar la calidad de vida después de una lesión o discapacidad en la mano.

Palabras clave:

Dedos, falanges, mano, ortesis, torques

Abstract

The following article focuses on the selection and design of a hand orthosis, a medical device used to aid in the recovery and rehabilitation of patients with hand injuries or disabilities. To achieve an effective recovery, it is essential to take into account the length of each of the phalanges and the maximum angles of the metacarpophalangeal, digital and proximal interphalangeal joints. Additionally, selection of the proper motor for the orthosis should be based on the dynamic and static torques needed to provide the required support and mobility. This article will provide valuable information for medical professionals and patients seeking to improve quality of life after hand injury or disability.

Keywords:

Fingers, hand, orthosis, phalanges, torques

Introducción

El estudio de las características biométricas de la mano humana es importante en diversas áreas, como la medicina, la ergonomía y la biomecánica. Los datos obtenidos a partir de mediciones precisas de la mano permiten diseñar herramientas, dispositivos y equipos que se adaptan de manera óptima a las necesidades de los usuarios.

La ortesis de la mano es un dispositivo médico que se utiliza para ayudar en la recuperación y rehabilitación de pacientes con lesiones o discapacidades en la mano; la selección adecuada de la ortesis es esencial para lograr una recuperación efectiva y hay que considerar varios factores importantes para su diseño y construcción. Uno de los aspectos más importantes es la longitud de cada una de las falanges, así como los ángulos máximos que pueden tener cada una de las articulaciones metacarpofalángicas, distal y proximal interfalángica. Estos datos son fundamentales para asegurar una adaptación perfecta de la ortesis a la mano del paciente.

Además, al seleccionar el motor adecuado para la ortesis, es esencial tener en cuenta los torques dinámicos y estáticos. Estos datos determinarán la capacidad del motor para brindar el soporte y la movilidad necesarios para la recuperación efectiva de la mano lesionada o discapacitada. Así pues, en este artículo se aborda la importancia de estos factores en la selección y diseño de ortesis de la mano y se brinda información valiosa para los profesionales médicos y los pacientes que buscan mejorar la calidad de vida, después de una lesión o discapacidad en la mano.

Marco teórico

La mano y las falanges

La mano humana es una herramienta increíblemente compleja y versátil, gracias a la cual podemos realizar una gran variedad de tareas cotidianas y deportivas. La mano se compone de 27 huesos, 14 de los cuales se encuentran en los dedos. Cada dedo está compuesto por tres falanges: la falange proximal, la falange media y la falange distal. La falange proximal se encuentra más cercana a la mano y se articula con el hueso metacarpiano correspondiente. La falange media, en cambio, se encuentra en el medio del dedo y la falange distal; es la más alejada de la mano y se articula con la uña.

Las falanges varían en tamaño y forma, la más pequeña de estas es la falange distal y, la más grande, la falange proximal. Adicionalmente, las falanges presentan diferentes ángulos de articulación que permiten la movilidad y flexibilidad de los dedos. Cada uno de los dedos cuenta con tres falanges, a excepción del dedo pulgar que no tiene falange media. (Vargas *et al.*, 2018)

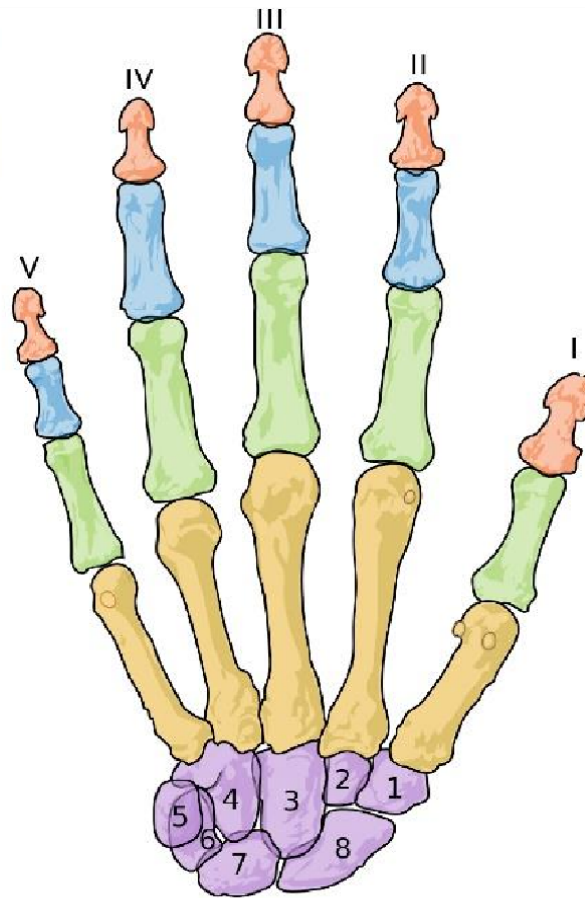
Figura 1. Huesos de la muñeca

Falanges distales (3ª)
Falanges medias (2ª)
Falanges proximales (1ª)
Metacarpianos o metacarpos
Carpianos o carpos

Dedos de la mano

- I Pulgar**
- II Índice**
- III Medio**
- IV Anular**
- V Meñique**

- 1. Trapecio
- 2. Trapezoide
- 3. Grande
- 4. Ganchoso
- 5. Pisiforme
- 6. Piramidal
- 7. Semilunar
- 8. Escafoides



Fuente: Belmonte, 2019

Longitud de los dedos

Para la elaboración de este trabajo se utilizó como referencia el artículo titulado “Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos”, que presenta dos tablas que muestran las longitudes de las falanges de los dedos de mujeres y hombres. Dichas tablas se dividen en rangos de edad, desde 18 a 64 años, y proporcionan información sobre las longitudes de ambas manos; tanto la izquierda como la derecha. Esta información resulta crucial para el cálculo de los torques ya que se puede obtener el promedio de las falanges de ambas manos y de las dos tablas, junto con su centro de masa, que es un dato indispensable para el cálculo del torque. En la investigación realizada se consideró únicamente la mano derecha como objeto de estudio. (Binvignat, 2012)

Dedo Pulgar

El dedo pulgar es responsable de la mayoría de la fuerza de agarre en la mano y es fundamental para muchas actividades cotidianas. La habilidad de oponerse a los otros dedos es una característica única de los humanos que nos ha permitido desarrollar herramientas y manipular objetos con una precisión increíble.

Tabla 1. Longitud media dedo pulgar

Edades	Hombres				Mujeres			
	Falange Proximal		Falange Distal		Falange Proximal		Falange Distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	41	41	32	32	36	37	29	28
20-24	40	40	32	32	37	36	29	28
25-29	42	42	34	34	38	37	29	29
30-34	41	41	32	31	32	32	27	26
35-39	39	38	32	31	37	36	27	27
40-44	40	40	31	31	35	36	28	28
45-49	44	43	33	32	36	35	28	27
50-54	41	40	32	32	35	35	29	28
55-59	39	40	33	33	33	33	28	28
60-64	38	38	33	33	34	31	28	28
	40.5	40.3	32.4	32.1	35.09	34.82	28.36	27.82

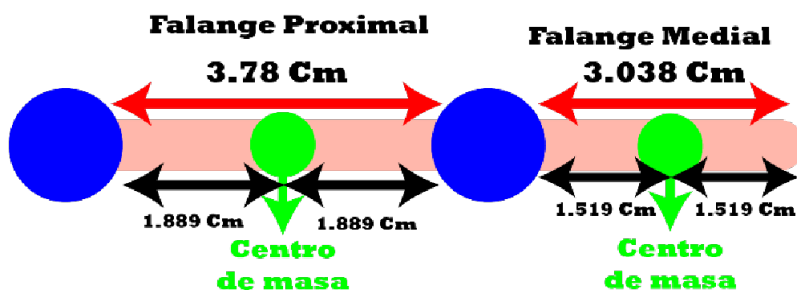
Fuente: Binvignat, 2012

Una vez obtenidos los promedios de edades, es necesario calcular los promedios de géneros correspondientes. Para hallar los centros de masa de las articulaciones, se divide la longitud total entre dos, ya que el centro de masa se encuentra en el centro de longitud de la articulación.

Promedio Hombres y Mujeres	
Falange Proximal	Falange Distal
37.80	30.38
Centros de Masa	
18.90	15.19 ¹

1 Los cuadros –como este– sin título y fuente incluidos en el presente escrito son de Elaboración propia

Figura 2. Centro de masa de las articulaciones del pulgar



Fuente: Elaboración propia

Dedo Índice

La función del dedo índice es crucial en la realización de una gran variedad de tareas cotidianas, incluyendo escribir, teclear en un teclado, manipular objetos pequeños, señalar, apuntar y hacer gestos comunicativos. Asimismo, su habilidad para señalar y apuntar lo hace esencial en actividades deportivas que requieren precisión y control, tales como el tiro con arco, la diana, el golf y otros deportes similares. Los datos de las siguientes tablas están dados en milímetros

Tabla 2. Longitud media dedo índice

Edades	Hombres						Mujeres					
	Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal		Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	51	51	31	32	24	24	44	43	27	28	22	22
20-24	50	50	31	31	24	24	45	45	28	28	22	22
25-29	50	51	31	31	25	25	46	46	29	29	23	23
30-34	49	50	32	32	25	24	36	35	24	23	20	20
35-39	43	44	30	29	24	25	44	44	28	29	21	21
40-44	50	50	30	31	24	24	46	45	28	28	22	22
45-49	53	50	32	32	24	25	45	45	28	28	23	22
50-54	51	51	31	31	24	24	43	42	27	27	22	22
55-59	47	48	30	30	25	25	38	39	25	24	22	22
60-64	45	45	31	31	25	25	37	39	25	25	21	21
	48.9		30.9		24.4		42.2		26.9		21.9	

Fuente: Binignat, 2012

Sus promedios y centros de masa son los siguientes:

Promedio Hombres y Mujeres		
Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
45.5	28.9	23.2
Centros de Masa		
22.77	14.45	11.58

Dedo Medio

Desde el punto de vista funcional como desde el punto de vista cultural, es el dedo más largo y fuerte de la mano y, gracias a él, podemos realizar una gran variedad de actividades cotidianas, como sujetar objetos grandes y pesados, abrir tapas, agarrar herramientas y realizar movimientos de precisión. Además, el dedo medio es esencial para la comunicación no verbal; en muchas culturas, levantar el dedo medio es considerado un gesto obsceno y ofensivo, mientras que en otras se utiliza para señalar algo con precisión. Desde el punto de vista anatómico, el dedo medio se compone de tres falanges: la falange proximal, la falange media y la falange distal

Tabla 3. Longitud media dedo medio

Edades	Hombres						Mujeres					
	Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal		Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano de	Mano izq	Mano de	Mano izq
18-19	55	53	35	35	25	25	46	46	32	32	23	23
20-24	53	54	36	35	25	25	49	48	32	32	23	23
25-29	56	55	37	36	27	27	50	49	33	32	23	24
30-34	53	53	35	36	27	26	39	38	28	28	23	23
35-39	47	47	33	32	26	26	50	50	32	32	23	22
40-44	55	55	34	35	26	26	49	48	32	32	24	24
45-49	57	57	38	37	26	26	49	49	33	32	24	23
50-54	56	56	36	36	26	26	46	45	31	31	24	23
55-59	53	52	36	35	27	28	41	41	29	28	23	23
60-64	49	51	35	35	26	26	40	37	28	29	23	22
	53.4		35.5		26.1		46		31.1		23.3	

Fuente: Binvignat, 2012

Sus promedios y centros de masa son los siguientes:

Promedio Hombres y Mujeres		
Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
49.7	33.3	24.7
Centros de Masa		
24.85	16.65	12.34

Dedo Anular

El dedo anular también tiene una importancia simbólica y cultural en muchas sociedades, ya que es el dedo en el que se coloca el anillo de compromiso o matrimonio. Históricamente, el dedo anular ha sido asociado con la vena amoris; una vena que, se creía, estaba conectada directamente al corazón. Anatómicamente hablando, el dedo anular es el dedo más largo después del dedo medio y está conectado al hueso del carpo, a través del metacarpo correspondiente. El dedo anular también tiene tres falanges, como todos los dedos de la mano, y cada una de ellas tiene un ángulo de flexión que le permite doblarse y extenderse.

Tabla 4. Longitud media dedo anular

Edades	Hombres						Mujeres					
	Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal		Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	44	43	31	31	23	23	51	50	34	34	24	25
20-24	45	45	30	30	23	23	50	50	34	34	25	25
25-29	45	45	31	32	23	23	51	52	35	35	27	27
30-34	35	34	26	24	21	22	49	49	34	35	27	26
35-39	47	46	30	30	22	22	44	44	31	30	26	26
40-44	46	46	31	31	24	24	52	51	33	33	25	25
45-49	45	45	31	30	23	23	52	52	36	36	26	26
50-54	43	42	30	30	23	23	52	52	34	34	25	25
55-59	37	37	27	27	23	23	49	49	33	33	27	26
60-64	34	35	27	28	22	22	45	46	33	33	27	26
	42.1		29.5		22.8		49.5		33.7		25.9	

Fuente: Binignat, 2012

Sus promedios y centros de masa son los siguientes:

Promedio Hombres y Mujeres		
Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
45.8	31.6	24.4
Centros de Masa		
22.90	15.79	12.18

Dedo Meñique

Su función es esencial para la estabilidad y equilibrio de la mano durante el agarre y la manipulación de objetos pequeños.

Tabla 5. Longitud media dedo meñique

edades	Hombres						Mujeres					
	Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal		Falange Proximal		Falange Medial		Falange Distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	36	35	22	23	20	21	40	40	25	25	22	23
20-24	37	36	22	22	20	20	40	41	25	25	23	23
25-29	37	37	23	23	20	20	42	42	27	28	24	24
30-34	29	29	19	19	19	19	40	40	26	26	23	23
35-39	37	37	22	22	20	19	34	35	24	23	23	23
40-44	37	37	23	22	20	20	40	39	27	26	22	22
45-49	37	37	23	23	20	20	43	43	27	27	23	23
50-54	34	33	21	22	20	20	43	42	26	25	22	22
55-59	30	30	20	20	19	20	39	38	25	25	24	23
60-64	30	29	20	21	19	20	38	38	25	26	23	24
	34.5		21.6		19.7		39.9		25.7		22.9	

Fuente: Binignat, 2012

Sus promedios y centros de masa son los siguientes:

Promedio Hombres y Mujeres		
Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
37.2	23.7	21.3
Centros de Masa		
18.61	11.83	10.66

Masa de las falanges de los dedos

La masa de cada una de las falanges de los dedos es un factor importante a considerar en la biomecánica de la mano. La masa de las falanges puede variar según la edad, el género y otros factores individuales. Por ejemplo, las falanges de los hombres suelen tener una masa mayor que las de las mujeres, debido a diferencias en la masa muscular y ósea.

La masa de las falanges es importante para entender la dinámica de la mano y su capacidad para generar fuerza y movimiento. Las falanges más distales, como las falanges distales del dedo índice y meñique, tienen una masa menor en comparación con las falanges proximales. Esto se debe a que las falanges más distales tienen una longitud más corta y, por lo tanto, menos masa. (Neumann, 2016)

La masa de las falanges también influye en la distribución de la carga durante la manipulación de objetos. Al comprender la distribución de la masa en las falanges, se pueden diseñar –de manera más efectiva– dispositivos y herramientas de asistencia para personas con discapacidades en la mano.

A continuación, se presenta una tabla en la que están registrados los datos de masa de cada una de las falanges de los dedos:

Tabla 6. Masa promedio de las falanges

DEDOS	Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
Pulgar	1.4 gr	NA	0.8 gr
Índice	1.2 gr	0.9 gr	0.6 gr
Medio	1 gr	0.7 gr	0.5 gr
Anular	0.8 gr	0.5 gr	0.3 gr
Meñique	0.5 gr	0.3 gr	0.2 gr

Fuente: Binignat, 2012

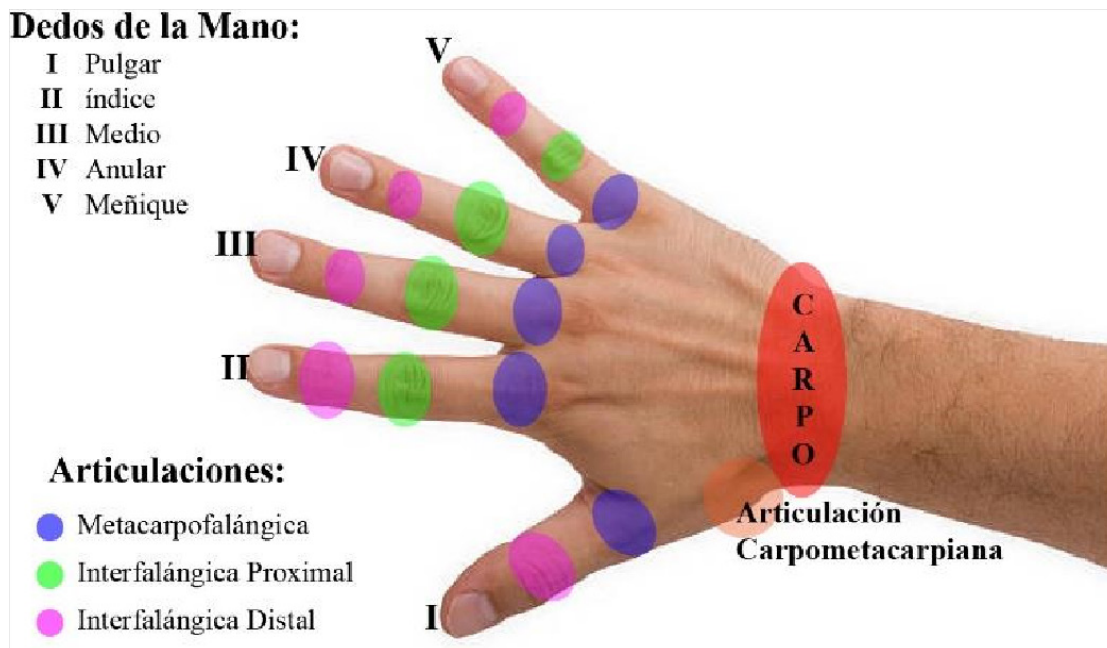
Movilidad de las Falanges de los Dedos

La mano es una de las herramientas más importantes que poseemos los seres humanos, y su capacidad de movimiento y precisión son cruciales para llevar a cabo las tareas diarias y actividades que hacemos en nuestra vida cotidiana. Las articulaciones de la mano son fundamentales para esta habilidad y, de todas las articulaciones que posee, las más importantes son las metacarpofalángicas y las interfalángicas (Magee, 2014). Las articulaciones metacarpofalángicas son las que conectan los huesos de la palma de la mano con los dedos, permitiendo que estos se doblen y se estiren. Estas articulaciones son vitales para la fuerza y la función de agarre de la mano y permiten que la mano pueda sostener objetos y realizar tareas manuales precisas y complejas.

Por otro lado, las articulaciones interfalángicas, tanto proximales como distales, conectan los huesos de los dedos entre sí, permitiendo la flexión y extensión de los dedos. Estas articulaciones son críticas para la habilidad de la mano de realizar una variedad de tareas finas y precisas, como escribir, teclear, tocar un instrumento musical, entre otras.

La flexibilidad y el rango de movimiento en estas articulaciones pueden verse afectados por diversos factores, como lesiones, enfermedades y deformidades congénitas. Es por eso que es importante cuidar y proteger nuestras manos para mantener la salud de estas articulaciones. El uso de dispositivos ergonómicos y de protección puede prevenir lesiones en la mano y las articulaciones, así como la realización de ejercicios de fortalecimiento y estiramiento pueden mejorar la flexibilidad y el rango de movimiento de las articulaciones.

Figura 3. Articulaciones de la mano



Fuente: Elaboración propia

Modelo matemático

Cálculo y ecuaciones de los torques (Estático, dinámico y total)

Spline cúbico

El spline cúbico es una técnica matemática utilizada para aproximar una función suave a partir de un conjunto de puntos de datos. La idea básica del spline cúbico es dividir el conjunto de puntos de datos en segmentos de tres puntos y ajustar una función cúbica en cada segmento, de modo que la función resultante sea suave y tenga continuidad en los puntos de unión entre los segmentos. (Hasegawa, 2019)

El método de spline cúbico es muy popular en análisis numérico y procesamiento de señales, ya que permite ajustar una función suave a partir de un conjunto de datos discretos. Se trata, además, de un método que tiene varias ventajas sobre otros métodos de interpolación, ya que es muy flexible, suave y no introduce oscilaciones indeseadas en la función aproximada.

En la práctica, el spline cúbico se implementa mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales que involucran los coeficientes de la función cúbica en cada segmento. Este sistema de ecuaciones se puede resolver eficientemente utilizando técnicas de álgebra lineal, como la factorización LU o la descomposición de Cholesky (Seo y Shim, 2019).

Los splines cúbicos se utilizan, principalmente, para la generación de trayectorias y generación de gráficas para ver la aceleración y velocidad de la trayectoria deseada. Para generar un spline cúbico se deben conocer sus puntos iniciales y finales en X y Y; adicionalmente, el número de puntos de la trayectoria de movimiento y la duración total de la trayectoria de movimiento de la función.

Conociendo esto, se adaptan las ecuaciones para utilizar en la ortesis, debido a que en nuestro caso utilizaríamos ángulos, en vez de posiciones exactas (como se ve en la Figura 4). Como resultado tendríamos las siguientes ecuaciones:

$$q_{11} \rightarrow [q_{11}, w_{11}, t_{11}] = \text{splinecúbico}(i, f, T_f, n) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$q_{12} \rightarrow [q_{12}, w_{12}, t_{12}] = \text{splinecúbico}(f, i, T_f, n) \quad \text{Ecuación 2}$$

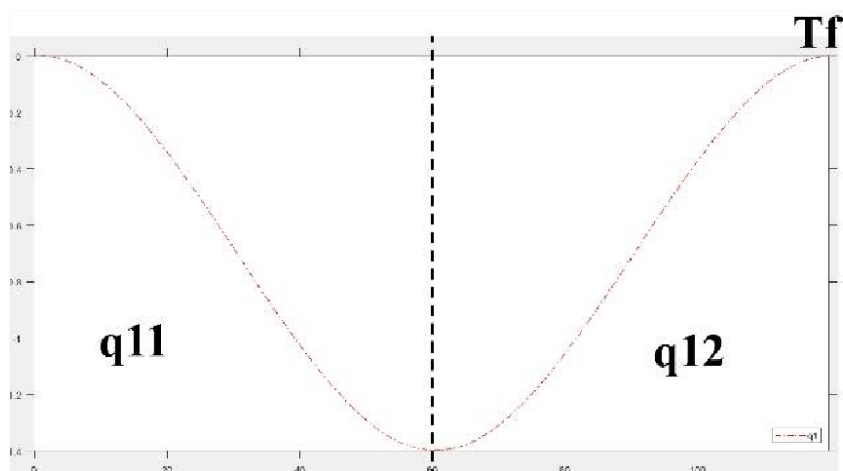
En donde:

i = Ángulo inicial

f = Ángulo final

T_f = Tiempo (duración total de la trayectoria de movimiento)

Figura 4. Ángulos spline cúbico



Fuente: Elaboración propia

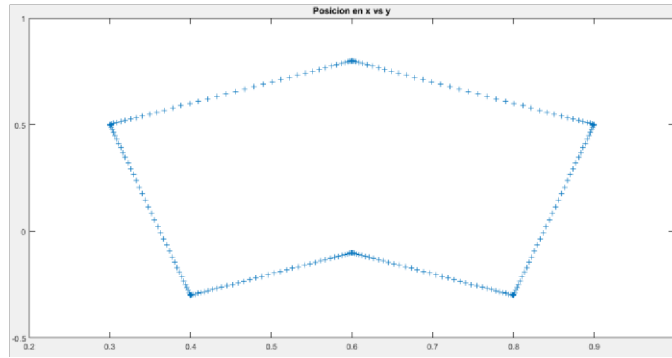
$$[x_{ab}, t] = \text{splinecúbico}(x_a, x_b, n, T_f)$$

$$[y_{ab}, t] = \text{splinecúbico}(y_a, y_b, n, T_f)$$

Ecuación 3 y 4

Las ecuaciones 3 y 4 se utilizan para la generación de una trayectoria desde un punto A hasta un punto B. A continuación, se puede apreciar una imagen de la generación de una trayectoria de 6 puntos con retorno, usando splines cúbicos

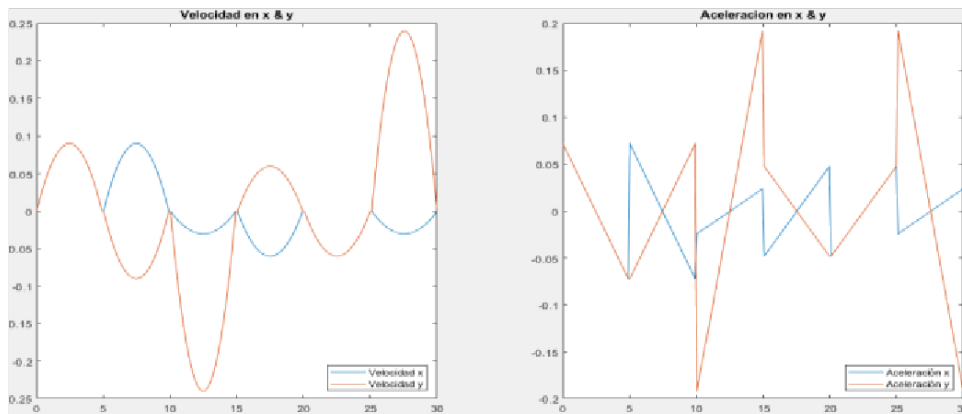
Figura 5. Generación de una trayectoria de 6 puntos



Fuente: Elaboración propia

Para hacer la anterior trayectoria con splines cúbicos se definieron 40 puntos para la trayectoria de movimiento y, de igual manera, definimos en 5 segundos la duración total de la trayectoria de movimiento. A continuación, se puede apreciar la gráfica de velocidad y aceleración de la misma

Figura 6. Velocidad y aceleración del splin cúbico



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la imagen anterior; el movimiento que realiza el dedo es, primero, de descenso y, luego, regresa a su posición original.

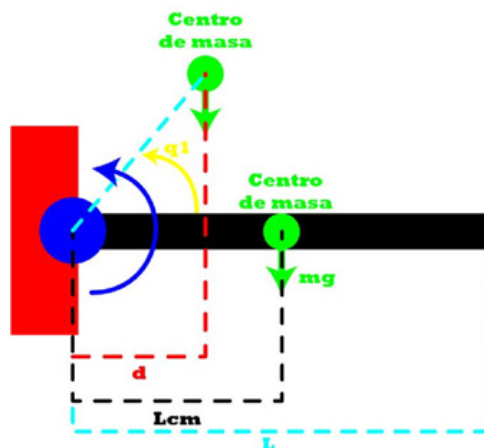
Torque Estático

El torque estático es una medida importante en la ingeniería mecánica y en el diseño de sistemas que involucran la rotación de objetos alrededor de un eje. En dicha ingeniería, el torque estático se utiliza para diseñar piezas y estructuras que se puedan sostener bajo la acción de la fuerza de la gravedad. También se utiliza para diseñar sistemas que tengan una posición de equilibrio estable y no se muevan debido a la fuerza de la gravedad. (Norkin, 2016)

En el diseño de sistemas robóticos y ortopédicos, el torque estático es importante para determinar la fuerza que se requiere para sostener un objeto en una posición determinada y para diseñar actuadores o motores que puedan proporcionar el torque necesario para lograrlo.

Desde un aspecto conceptual, el torque estático es una medida del momento generado por una fuerza en una posición fija, en relación con un punto de rotación o eje de giro. En otras palabras, el torque estático es el resultado de la fuerza de gravedad que actúa sobre un objeto con una distancia perpendicular, desde el punto de rotación.

Figura 7. Torque estático



Fuente: Elaboración propia

La fórmula para hallar el torque estático es la siguiente:

$$Te = mg * d(t) \quad \text{Ecuación 5}$$

m = Masa de la articulación

g = Gravedad (9.81m2)

d(t) = Distancia vertical desde cada masa hasta el punto de rotación.

Y la de la distancia vertical es:

$$d(t) = Lcm * \cos(qT) \quad \text{Ecuación 6}$$

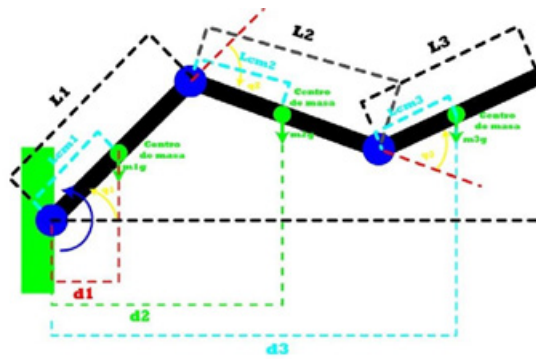
Lcm = Centro de masa longitudinal

Por lo que, juntando todas las ecuaciones, tendríamos que la formula final para el torque estático es la siguiente:

$$Te = mg * (Lcm * \cos(q11, q12)) \quad \text{Ecuación 7}$$

Conociendo la ecuación comenzaríamos creando nuestro diagrama con las tres articulaciones con las que cuenta cada dedo.

Figura 8. Diagrama de 3 articulaciones



Fuente: Elaboración propia

Guiándonos por el gráfico, sacamos los torques estáticos de cada articulación y los sumamos:

$$T1 = m1 * g * d1 + m2 * g * d2 + m3 * g * d3 \quad \text{Ecuación 8}$$

La distancia vertical desde cada masa hasta el punto de rotación sería:

$$\begin{aligned} d1 &= Lcm1 * \cos(q1) \\ d2 &= d1 + Lcm2 * \cos(q1 + q2) \\ d3 &= d2 + Lcm3 * \cos(q1 + q2 + q3) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 9}$$

Como ya se conoce la fórmula, solo faltaría reemplazar los valores por cada una las longitudes de las articulaciones, sus ángulos y masas para hallar los gráficos.

Torque Dinámico

El torque dinámico es la medida de la fuerza que impulsa el movimiento rotatorio de un objeto; es importante en la física, la ingeniería y la biomecánica porque permite entender el comportamiento de los objetos en movimiento y diseñar sistemas mecánicos eficientes y seguros.

En el contexto de la biomecánica, el torque dinámico es especialmente importante en la evaluación del rendimiento y la prevención de lesiones en los sistemas musculoesqueléticos. Por ejemplo, en la rehabilitación de una lesión muscular o en la evaluación del rendimiento deportivo, el torque dinámico puede utilizarse para medir la fuerza y la capacidad de los músculos y articulaciones para realizar movimientos específicos. Por su parte, en ingeniería, se trata de un torque es fundamental en el diseño de motores y otros sistemas mecánicos que utilizan la rotación para realizar un trabajo. La capacidad de un motor para generar torque es un factor clave en su capacidad para realizar trabajo útil, y el diseño de un motor eficiente depende en gran medida de la capacidad de generar un alto torque dinámico con una alta eficiencia energética (Enwemeka, 2016).

Por consiguiente, el torque dinámico nos ayuda a la selección del motor y su ecuación es la siguiente:

$$T_d = I * \alpha \quad \text{Ecuación 10}$$

I = Inercia

α = Velocidad angular

Por lo que el torque dinámico para cada articulación sería el siguiente:

$$T_{1d} = I_1 \alpha_1 + I_2 \alpha_2 + I_3 \alpha_3$$

$$T_{2d} = I_2 \alpha_2 + I_3 \alpha_3$$

$$T_{3d} = I_3 \alpha_3 \quad \text{Ecuación 11}$$

Y la fórmula de la inercia:

$$I = \frac{ml^2}{3} \quad \text{Ecuación 12}$$

Torque Total

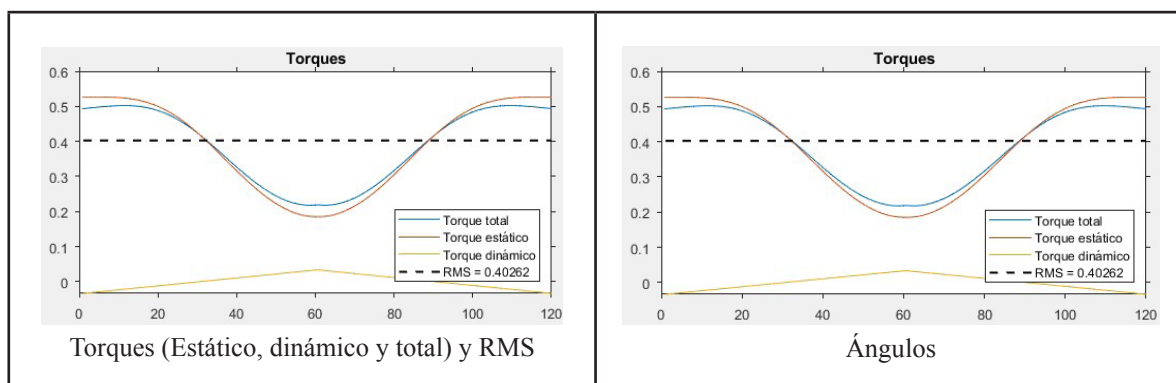
El torque total se utiliza para determinar la cantidad total de esfuerzo que se está aplicando en la ortesis de mano. Esto es importante para evaluar si la ortesis es capaz de proporcionar suficiente soporte y resistencia a los movimientos de la mano y los dedos. Si el torque total excede la capacidad de la ortesis puede haber un riesgo de lesiones o daño en el dispositivo. Por ende, el torque total puede ser una medida importante para diseñar dispositivos de asistencia, como las ortesis de mano. (Hasegawa, 2019)

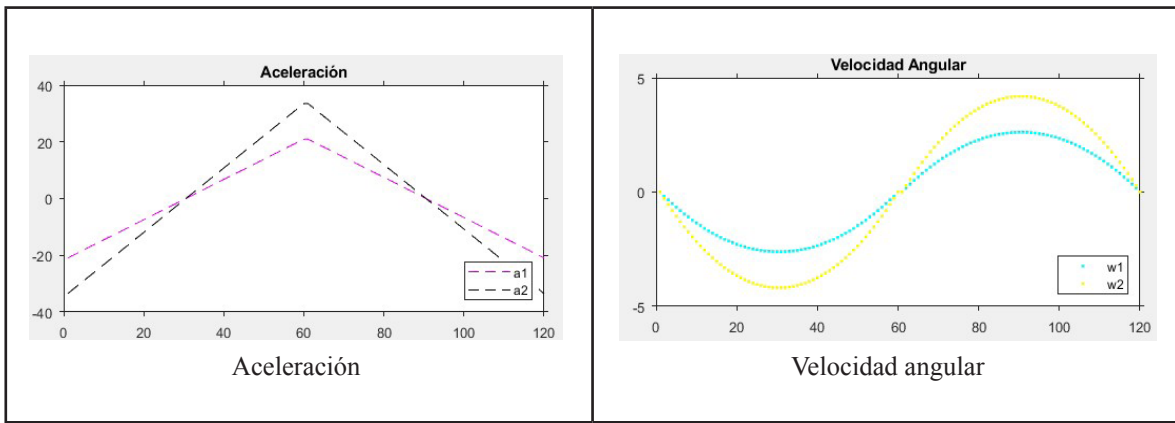
Graficas de los torques (Estático, dinámico y total)

Para la elaboración de las gráficas en Matlab se tomaron los datos de longitud, masa y movimientos articulares incluidas en la sección del Marco teórico.

Dedo Pulgar

Figura 9. Torques dedo pulgar

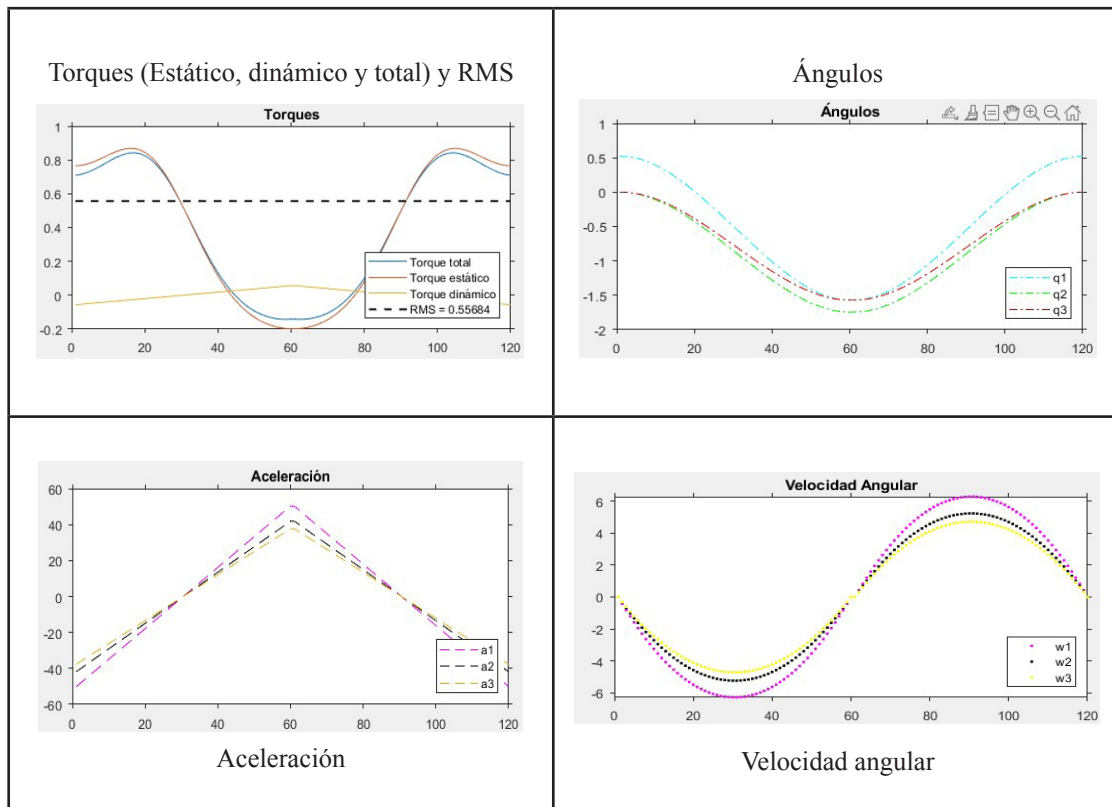




Fuente: Elaboración propia

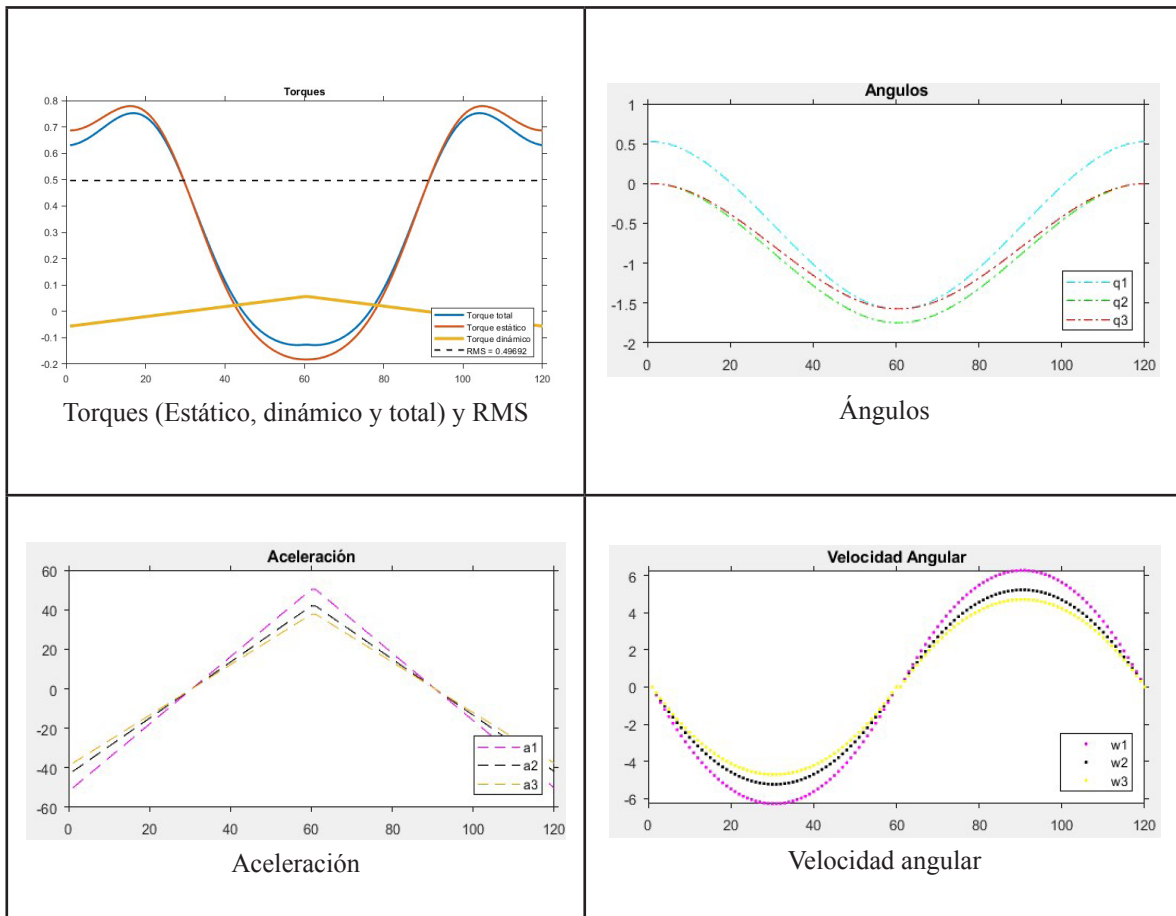
Dedo Índice

Figura 10. Torques dedo índice



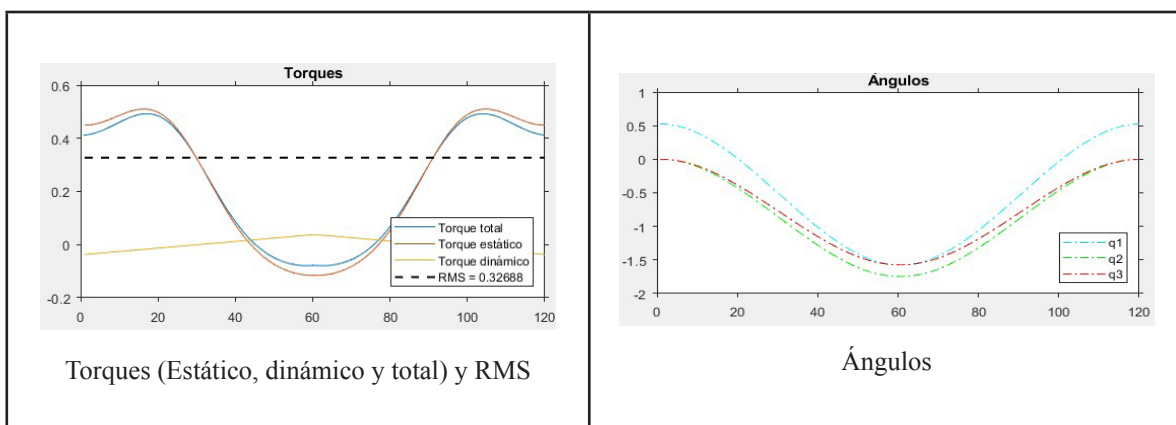
Fuente: Elaboración propia

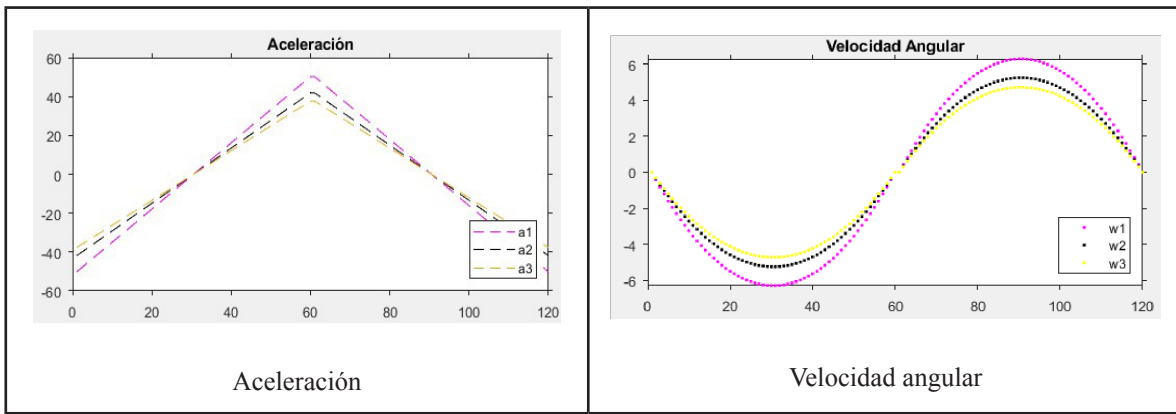
Figura 11. Torques dedo medio



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Torques dedo anular

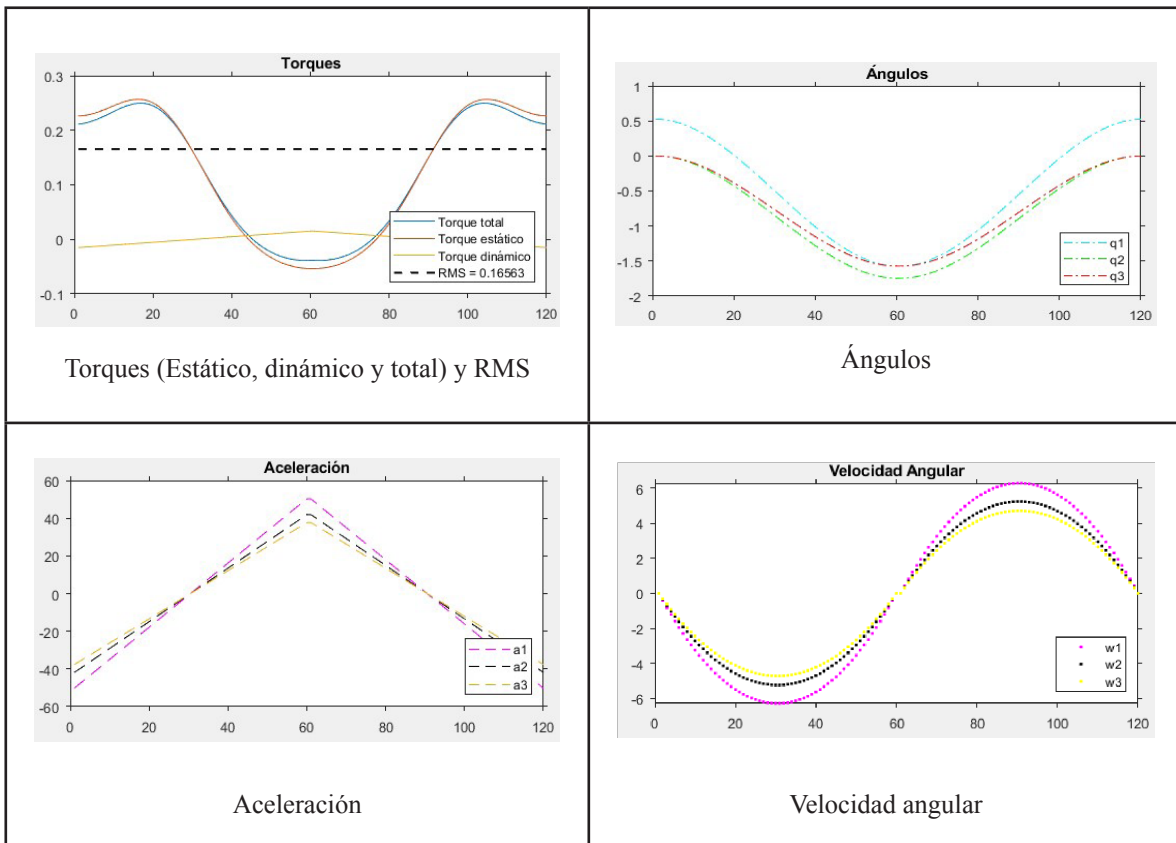




Fuente: Elaboración propia

Dedo Meñique

Figura 13. Torques dedo meñique



Fuente: Elaboración propia

Selección del motor

Torques (Estático, dinámico y total) y RMS:

El MG995 es un servo motor de alta calidad producido por TowerPro; un fabricante chino de electrónica y componentes para robótica. Es uno de los servos más populares y ampliamente utilizados en la comunidad de robótica, debido a su gran capacidad de carga, alta velocidad, precisión y durabilidad. El

MG995 es un servo digital, lo que significa que se controla mediante señales de pulso digital; su rango de rotación es de 180 grados, con una resolución de 1 grado, lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones, desde robots de juguete hasta brazos robóticos industriales.

Dicho servo tiene un par de torsión, máximo de 10 kg/cm a 4,8 V, lo que lo hace adecuado para levantar cargas pesadas y para aplicaciones que requieren un alto nivel de precisión y control de movimiento. Asimismo, tiene una velocidad de rotación de 0,17 segundos/60 grados a 4,8 V, lo que significa que puede realizar movimientos rápidos y precisos.

El MG995 está construido con materiales de alta calidad y tiene una carcasa de plástico resistente que lo hace duradero y resistente a los impactos. Además, cuenta con un sistema de engranajes metálicos que garantiza una mayor vida útil del motor y una mayor precisión en los movimientos. En suma, el MG995 es un servo motor de alta calidad, confiable y versátil, ampliamente utilizado en la comunidad de robótica, debido a su capacidad de carga, velocidad, precisión y durabilidad.

Referencias

- Belmonte, A. (23 de mayo de 2019). Nombres de los huesos de la muñeca. Unprofesor blog. <https://www.unprofesor.com/ciencias-naturales/nombres-de-los-huesos-de-la-muneca-3362.html>
- Binvignat, O., Almagià, A., Lizana, P., y Olave, E. (2012). Aspectos biométricos de la mano de individuos chilenos. *International Journal of Morphology*, 30(2), 599-606. https://www.researchgate.net/publication/262715372_Aspectos_Biometricos_de_la_Mano_de_Individuos_Chilenos
- Enwemeka, C. (2016). *Joint range of motion and flexibility. Assessment and management. In Handbook of Sports Medicine and Science, Sports Therapy Services.* Wiley-Blackwell (pp. 123-139).
- Hasegawa, Y., Mikawa, Y., Watanabe, R., An, K., y Takahashi, H. (2019). Biomechanical Analysis of the Human Finger Extensor Mechanism during Isometric Pressing. *PLoS ONE* 9(4): e94533. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094533>
- Magee, D. (2014). *Orthopedic physical assessment.* Elsevier / Saunders
- Norkin, C., y Levangie, P. (2016). *Joint structure and function. A comprehensive analysis.* F.A. Davis Company.
- Neumann, D. (2016). *Kinesiology of the musculoskeletal system. Foundations for physical rehabilitation.* Elsevier.
- Seo, J., y Shim, J. (2019). Estimation of the finger mass and center of mass for dynamic analysis of hand movements. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(2), 209-217. <https://link.springer.com/journal/12541/volumes-and-issues/20-2>
- Vargas, J., Sotelo, J., Hernández, R., y del Carmen, M. (2018). Anthropometric study of the hand and fingers in a Mexican population. <https://www.nepjol.info/index.php/JLMC/article/view/40711/30999>