



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE BIOMEDICINA

CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS DE UNA PRÓTESIS DE
MANO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA BIOMÉDICA

AUTOR: CAMILA NICOLE GUAICHA MORENO

TUTOR: Ing. LUIS GEOVANNY ROMERO MEJÍA, MSc

Quito-Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Camila Nicole Guaicha Moreno con documento de identificación N° 1753082724, manifiesto que:

Soy autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 7 de agosto del 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Camila Nicole Guaicha Moreno', written in a cursive style.

Camila Nicole Guaicha Moreno
1753082724

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Camila Nicole Guaicha Moreno con documento de identificación No.1753082724, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto Técnico: **CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS DE UNA PRÓTESIS DE MANO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Biomedicina, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 7 de agosto del 2024

Atentamente,



Camila Nicole Guaicha Moreno
1753082724

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Geovanny Romero Mejía con documento de identificación N° 1714731203, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LOS DEDOS DE UNA PRÓTESIS DE MANO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**”, realizado por Camila Nicole Guaicha Moreno con documento de identificación N° 1753082724, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 7 de agosto del 2024

Atentamente,



Ing. Luis Geovanny Romero Mejía, MSc
1714731203

Dedicatoria

A Dios por permitirme ser la persona que soy, por acompañarme en mi camino y no abandonarme nunca

Agradezco a mi padre por su inmenso sacrificio, por su amor absoluto y su guía infalible.

A mi madre por brindarme un apoyo incondicional, por ser fundamental en este proceso, su abnegación y devoción.

A mis hermanos por brindarme su amistad, apoyo, alegrías y consuelo.

Lo logramos

Camila Guaicha Moreno

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme vivir la realidad que me permitió llegar a este punto, por estar presente siempre y brindarme la familia que tengo.

A la Universidad Politécnica Salesiana por fomentar el espacio para el desarrollo de la ciencia en la juventud, y su carisma salesiano.

A mis profesores y tutor por brindarme una guía en la elaboración del presente proyecto de titulación. Amigos y compañeros por acompañarme en estos años y hacer de este tiempo una experiencia única.

Camila Guaicha Moreno.

Resumen

En el presente proyecto de titulación se presenta el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano mediante visión artificial. El control del dispositivo protésico se realizó en base a la comunicación entre la visión artificial desarrollada en Python y Arduino con el fin de lograr el control de los actuadores para efectuar la replicación de los movimiento dactilares. La recopilación de información relacionada al tema se estructuró en base a agrupamiento de datos en el marco teórico, además de establecer un proceso metodológico, resultados y pruebas de funcionamiento, con el fin de establecer una disución sólida y conclusiones.

Palabras clave: (Visión artificial, control, movimiento, prótesis, algoritmo).

Abstract

This degree project presents the control of the movement of the fingers of a hand prosthesis by means of artificial vision. The control of the prosthetic device is based on the communication between the artificial vision developed in Python and Arduino in order to achieve the control of the actuators to replicate the finger movements. The compilation of information related to the topic is structured based on data grouping in the theoretical framework, in addition to establishing a methodological process, results and performance tests, in order to establish a solid disucssion and conclusions.

Keywords: Artificial vision, control, motion, prediction, algorithm, algorithm, control, movement)

Contenido

Agradecimientos	vi
Resumen	vii
1. Introducción	2
1.0.1. Objetivos	3
2. Marco teórico	5
2.1. Anatomía de la mano	5
2.1.1. Piel	5
2.1.2. Músculos	6
2.1.3. Estructuras óseas	9
2.1.4. Dedos	11
2.2. Prótesis	12
2.2.1. Prótesis de miembros superiores	13
2.3. Visión artificial	15
2.3.1. Reconocimiento de manos mediante Mediapipe	18
3. Metodología	20
3.1. Metodología de investigación	20
3.2. Metodología del proceso	20
3.2.1. Recopilación de datos	21
3.2.2. Identificación de técnicas	22
3.2.3. Generación de algoritmos	26
3.3. Implementación física	30
4. Resultados	33
4.0.1. Resultado del proyecto	33
4.0.2. Criterios para las pruebas de funcionamiento	34
4.0.3. Base de datos	36
4.0.4. Pruebas de funcionamiento	36
4.0.5. Resultados de las pruebas	40
4.0.6. Discusión	41

5. Conclusiones y recomendaciones	43
5.1. Conclusiones	43
5.2. Recomendaciones	43
A. Anexo A: Código principal	45
B. Anexo B: Código	46
C. Anexo C: Código extracción de gestos	47
D. Anexo D: Código Dibujo funciones	50
E. Anexo E: Código comunicación	52
F. Anexo F: Código	53
G. Anexo G: Código comunicación Arduino	55
H. Anexo H: Consentimiento informado	58
Bibliografía	60

1. Introducción

El control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano es fundamental para la salud debido a que permite a los usuarios con discapacidades físicas en la mano mantener funciones específicas, generalmente consecuentes de complicaciones médicas como las amputaciones, malformaciones, problemas cerebro vasculares, entre otros.

Los dedos son estructuras anatómicas que forman parte de la mano, se ubican en una posición distal según Stewart y Ghareeb (2023). Las estructuras dactilares representan una amplia gamma de movimientos, por lo que el control de los dedos en una prótesis de mano representa gran parte de la funcionalidad del dispositivo.

La visión artificial es una rama en desarrollo que ha tomado un impulso relevante en la actualidad, ya que se presenta como una herramienta con capacidades de reconocimiento, comprensión e interpretación de elementos visuales, mediante la captación de imagen y vídeo (Lei et al., 2024). La propuesta de este proyecto se fundamenta en la aplicación de esta técnica por su función en el control para el comando del dispositivo protésico de miembro superior.

El proyecto planteado en el trabajo de titulación se presenta como un método de control con variaciones en comparación al campo actual de manejo de dispositivos protésicos, hoy en día existen técnicas populares generalmente usadas por el campo de la ingeniería biomédica, entre ellas se encuentra el electromiograma o EMG perteneciente a el control por bioseñales. Las prótesis presentan precedentes sobre las técnicas de control para dispositivos biónicos, el manejo se encuentra principalmente basado en el procesamiento de señales fisiológicas, eléctricas y mecánicas, como el potencial de acción generado por los músculos al realizar un movimiento (Yatsun et al., 2024). Las prótesis se encuentran delimitadas debido a su método de control dentro de las principales tenemos las prótesis mecánicas, eléctricas, neumáticas, híbridas y por bioseñales.

Las bioseñales son aquellas emitidas por el cuerpo humano, desde las cuales se puede obtener un patrón de control generado por el músculo que se acciona al momento de generar un movimiento, la técnica que destaca es las electro-miografía, el funcionamiento de la misma surge por la detección del potencial de acción, en su contracción y relajación.

Dentro de las bioseñales tenemos el EMG(electromiografía) que es un sistema de control

mediante potencial de acción de los grupos musculares, este método ha sido refinado por la industrial comercial, es decir por las entidades empresariales encargadas de la venta de dispositivos protésicos generados mediante EMG; este método presenta una precisión elevada, sin embargo, en la actualidad aún están presentes problemas relacionados con la entrada de ruidos en las señales emitidas por el potencial muscular, además de la dependencia del EMG a el uso de los electrodos dado que debido a sus factores de tiempo y de uso tienden a perder su capacidad de conducción.

Los problemas del EMG han generado una necesidad de innovación con enfoques diferentes, la falta de investigación en técnicas de reconocimiento de movimientos de las manos, restringe la búsqueda de opciones debido en el campo de la biomédica el desarrollo de esta herramienta podría brindar una perspectiva diferente, generando alternativas.

La problemática presente el proyecto se encuentra principalmente en la falta de desarrollo, lo que limita la innovación y el mejoramiento de técnicas actuales como la electromiografía, como se indico previamente esta técnica afectada por el ruido de la señal, la dependencia de los electrodos, y la deficiencia del sistema físico en el censado de la bioseñales genera interrupción en el control de prótesis, ocasionando falsos comandos, o no emitiendo señales de control, por lo tanto podría generar un sistema inestable.

La solución a el problema planteado, se encuentra en el desarrollo del control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano mediante la aplicación de técnicas de visión artificial, es importante destaca que el proyecto se establece en base del desarrollo de algoritmos de programación de visión artificial, además del control mediante programación en lenguajes C, y el uso de actuadores, generando un sistema de reconocimiento de los dedos originando patrones de control del movimientos dactilares con la finalidad de permitir la replicación de las acciones en la mano protésica y establecer un método de control que no dependa de bioseñales, y resulte diferente a las tecnologías actuales.

1.0.1. Objetivos

Objetivo general

Realizar el control de los movimientos de los dedos de una prótesis de mano, mediante la aplicación de algoritmos de visión artificial con la finalidad de establecer un método de replicación de movimientos distinto a los convencionales.

Objetivo específico

- Identificar los principios de aplicación de la visión artificial en el control del movimiento de los dedos de una prótesis de manos, mediante la búsqueda del estado del arte, con

la finalidad de establecer métodos específicos de control.

- Desarrollar un sistema de seguimiento del movimiento de los dedos mediante algoritmos de visión artificial para el control de una prótesis de mano.
- Evaluar el sistema de control por visión artificial, a través de pruebas de funcionamiento para determinar la efectividad del sistema.

En cuanto al proceso de para el cumplimiento de los objetivos se encuentra la realización para lograr el objetivo principal y los objetivos específicos la metodología toma un lugar esencial, porque permite pormenorizar exclusivamente el procedimiento a tomar, se encuentra detallado en el capítulo tres.

La recopilación de datos se realizará en base a la búsqueda del estado del arte, la generación de algoritmos será mediante el uso de programación en python y Arduino.

El análisis de resultados se llevó a cabo con la finalidad de delimitar la efectividad de el método de control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano, mediante visión artificial, el desglose del proceso se encuentra en el capítulo cuatro.

2. Marco teórico

2.1. Anatomía de la mano

La mano se define como una estructura corporal que es parte del miembro superior, entendido como un órgano que posee funciones específicas características de las operaciones de la estructura anatómica, entre las funciones de la mano se encuentran el agarre, y la manipulación (Bazira, 2022).

Este órgano es una estructura anatómica que tiene propiedades tipo motoras finas, principalmente lleva a cabo el rol de agarre, movimiento, tacto, entre otros. La precisión de la mano es una cualidad propia de la misma otorgado gracias a su grados de libertad (Yegin & Onat, 2022).

La ubicación de la mano se encuentra delimitado por la articulación de la muñeca. La mano se encuentra conformada por una estructura ósea, además de un aparato sensorial y motor fino (Bazira, 2022) que permiten realizar diferentes funciones como un nivel de precisión elevado, además del tiro y la prensión, entre muchos otros movimientos.

La anatomía de la mano se conforma por huesos, articulaciones, músculos, tendones, piel, dedos, nervios y vasos sanguíneos, a continuación se detalla los principales elementos de la órgano, y su anatoía.

2.1.1. Piel

La piel es un órgano del cuerpo humano, que se encuentra formado por tres capas epidermis, dermis e hipodermis, este órgano forma parte fundamental de la protección del cuerpo.

La piel toma un papel importante en las funciones de la mano, en esta estructura anatómica las diferentes densidades de los tejidos son fundamentales, debido a la diversidad de las actividades que cumple la mano en el diario vivir. La piel de las distintas partes del órgano de la mano es variante, en específico las palmas de la mano al ser un sitio con mayor frecuencia de uso tienden a tener una densidad de piel más gruesa, este tejido palmar posee además pliegues de la dérmis que se caracterizan por contener una mayor cantidad de órganos sen-

soriales(Stewart & Ghareeb, 2023).

En las manos el tejido adiposo conectivo se encuentra por debajo de la dermis(Stewart & Ghareeb, 2023). El tejido adiposo ayuda a que la dermis y la fascia de la palma se sujeten, además de unirlo con estructuras óseas internas.

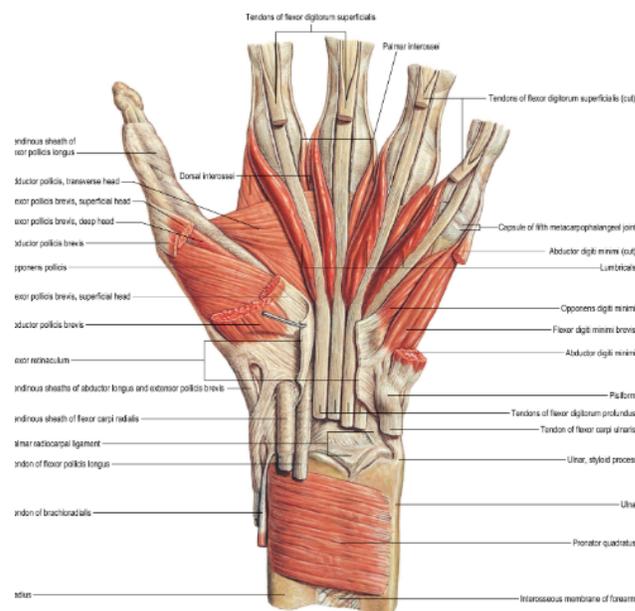
La movilidad de la piel de la palma es reducida, esto permite tener una mejor capacidad de agarre, además de ser una de las partes que se encuentran expuestas al exterior con mayor frecuencia.

La piel del dorso de la mano por lo contrario es móvil, debido a la baja frecuencia de roce entre estructuras externas y el tejido.

2.1.2. Músculos

Las fibras musculares forman los músculos que se ubican en la mano, y delimitan la función de movimiento de esta estructura anatómica de miembro superior, el tejido muscular es el responsable de permitir el movimiento de la mano mediante potencial de acción.

Figura 2-1.:
Músculos intrínsecos



Nota. Imagen músculos intrínsecos. Adaptado de (Bazira, 2022).

La mano esta formada mediante músculos intrínsecos que son aquellos que surgen mediante el origen y la intersección del músculo en una misma región(Bazira, 2022). Los músculos intrínsecos se caracterizan por permitir la modulación del origen de la generación de los movimientos, es decir permiten refinar el desarrollo de las funciones motoras de la mano.

Los músculos intrínsecos se encuentran dentro de cuatro grupos los músculos interóseos, lumbriales, además de los músculos hipotenares y tenares(Bazira, 2022).

En específico los músculos palmares de la mano tiene una división de cinco zonas(Stewart & Ghareeb, 2023).

1. Zona uno: Inicia desde la intersección del tendón del flexor profundo en la última falange a la intersección y termina en el tendón del flexor sublims en la falange media.
2. Zona dos: Empieza en el tendón del flexor sublims en la falange media hasta la polea A1.
3. Zona tres: Inicia en la polea A1 hasta el ligamento transversal del carpo.
4. Zona cuatro: Se encuentra en el túnel carpiano.
5. Zona cinco: Inicia en el borde del túnel carpiano hasta las miotendíneas de los flexores.

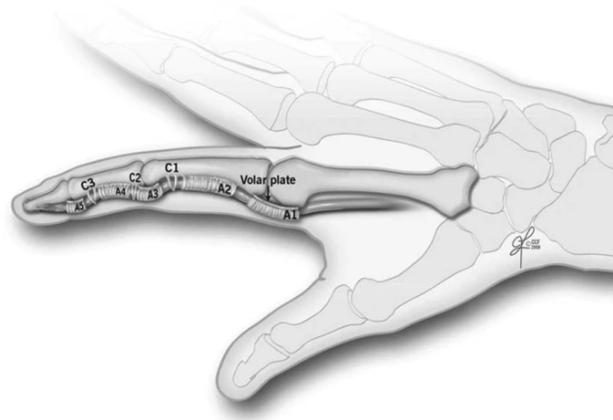
La palma de la mano tiene una división de ocho zonas extensoras entre las cuales se encuentra la zona sobre la articulación interfalángica distal también conocida como DIP, además sobre la falange media, la articulación interfalángica proximal o PIP, la falange proximal, sobre el dorso de la mano, el retináculo extensor, el antebrazo distal y la articulación MCP o metacarpofalángica(Stewart & Ghareeb, 2023).

Flexión y extensión digital

La flexión digital es la disminución del ángulo entre las articulaciones que forman parte de la anatomía de los dedos.

Es un movimiento básico de la estructura anatómica, fundamental para permitir el funcionamiento de los dedos acorde a los parámetros normales de la mano.

Figura 2-2.:
Flexión y extensión digital



Nota. Imagen dedo. Adaptado de (Stewart & Ghareeb, 2023).

La figura 2-2 es referencial para la identificación de las estructuras anatómicas que conforman la mano en específico refiere las zonas de las articulaciones delimitadas por secciones como A1, A2, A3, A4 Y A5, el seccionamiento de las regiones mediante esta nomenclatura permite delimitar la ubicación de los elementos que forman parte de los dedos. La articulación MCF también conocida como articulación metacarpofalángica, se encuentra encima de A1, mientras que A3 esta por debajo de IFP o articulación interfalángica proximal (Stewart & Ghareeb, 2023). Las secciones A2, A4, se encuentra debajo de las estructuras óseas conocidas como falanges.

La extensión por lo contrario de la flexión se refiere a el aumento o ampliación de los ángulos entre dos articulaciones que forman parte de las estructuras digitales, este incremento de grados ocurre debido a la función de estructuras relacionadas como los ligamentos y los tendones que rodean las articulaciones que forman parte de los dedos. Los elementos más importantes son las bandas sagitales, el deslizamiento central y las bandas laterales(Stewart & Ghareeb, 2023).

En el movimiento de ampliación de ángulos la función de las bandas sagitales permite la extensión de la falange proximal, además el deslizamiento central permite la extensión del PIP también conocida como articulación interfalángica proximal, por otro lado las bandas laterales tienen un papel significativo al momento de impedir que existe la subluaxación es decir evitan desplazamientos anormales (Stewart & Ghareeb, 2023).

En esta estructura anatómica existen ligamentos(tejidos fibrosos que permite la unión entre

portantes se encuentran principalmente aquellas que forman parte de la articulación de la muñeca, debido a que le brindan a la mano una mayor cantidad de funciones.

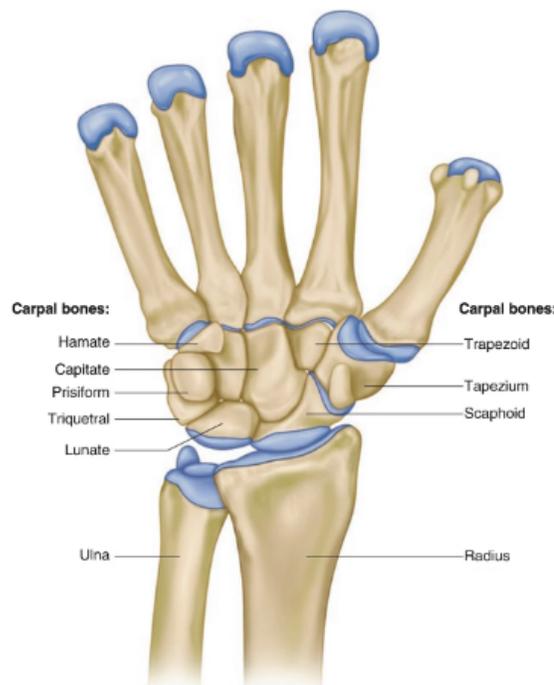
En la sección siguiente se detalla las estructuras óseas más importantes que conforman la mano.

El carpo

El carpo es una estructura ósea que se caracteriza porque es parte de la articulación de la muñeca, la estructura se encuentra conformada por ocho huesos.

Figura 2-4.:

El carpo



Nota. Imagen el carpo. Adaptado de (Dellon & Dellon, 2019).

Los huesos grande, ganchoso, trazoide y trapecio se articulan con las falanges, además de presentar ligamentos intercarpianos .El escafoides es el hueso que se encuentra avecindando con el semilunar, por otro lado el trapezio forma parte de la articulación CMC (carpometacarpiana) del pulgar que es de tipo silla de montar(Pillemer, 2022).

Los metacarpianos son cinco y forman sobre todo los nudillos, en exclusivo el metacarpiano

que es parte del dedo pulgar que es la estructura ósea más gruesa(Pillemer, 2022).

La mano, además se caracteriza por tener tres falanges en los dedos meñique, índice, medio y anular, mientras que en el pulgar solo existe dos estructuras óseas de este tipo.

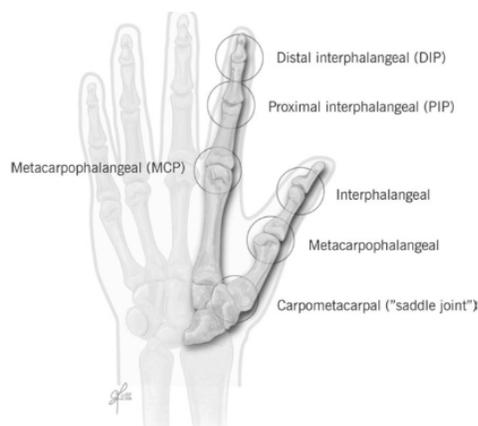
La biomecánica de los dedos se desarrolla en base cualidades propias de las estructuras dactilares la longitud de las articulaciones y falanges, además de las dimensiones de trabajo en ángulos y los pares de torsión(Yegin & Onat, 2022) de cada articulación.

2.1.4. Dedos

Los dedos son estructuras anatómicas que forman parte de la mano. Las articulaciones de los dedos son tres la articulación metacarpofalángica, interfalángica proximal e interfalángica distal(Stewart & Ghareeb, 2023).

La articulación metacarpofalángica se caracteriza por presentar una mayor movilidad en comparación a las articulaciones interfalángicas proximales y distales. La articulación metacarpofalángica es de tipo elipsoide o cóndila es decir que es una articulación sinovial con dos grados de libertad el primero flexoextensión y la abducción-aducción, esta cualidad permite un desplazamiento radial y cúbital. Las articulaciones interfalángicas son de tipo gínglimo o bisagra, llamadas así por poseer únicamente un grado de libertad (Stewart & Ghareeb, 2023).

Figura 2-5.:
Articulaciones de los dedos



Nota. Imagen de las articulaciones de los dedos. Adaptado de (Choi et al., 2023).

Existen cinco dedos que forman parte de la mano el pulgar, índice, medio, anular y meñique. El pulgar es el dedo más complejo del órgano motor.

Pulgar

El pulgar es un dedo con características distintas en comparación con el resto de estructuras digitales, debido a que posee funciones específicas como la oposición, además posee una estructura anatómica diferente a los cuatro dedos restantes que forman parte de la estructura de la mano.

Anatómicamente el dedo pulgar presenta una falange proximal y distal (Stewart & Ghareeb, 2023) y contiene tres articulaciones que forman la estructura ósea, la primera la articulación interfalángica, la segunda la articulación metacarpofalángica, y la articulación trapecio metacarpiana, esta última se caracteriza por ser de tipo silla de montar bicóncava con dos grados de libertad. El dedo pulgar se destaca por tener una mayor cantidad de movimientos, presenta la oposición y retropulsión, además de la pronación y supinación, aducción y abducción, y la flexoextensión (Stewart & Ghareeb, 2023).

2.2. Prótesis

Las prótesis son dispositivos biomédicos que buscan contrarrestar los efectos producidos por la falta de capacidades resultados de discapacidades, además de mejorar la calidad de la vida de los usuarios con deficiencias físicas, y de permitir la rehabilitación (Yatsun et al., 2024).

Existen distintas prótesis desarrolladas para las diferentes partes del cuerpo entre las más populares tenemos las de miembros superiores e inferiores, rodilla, dentales, oculares y auditivas, además de las prótesis cardiovasculares, y de cadera.

El principio de funcionamiento de las prótesis se basa en el control mediante señales corporales, eléctricas o mecánicas que mediante el procesamiento de la señal permiten el manejo de la prótesis. Entre las señales más importantes tenemos la voz como ejemplo podemos indicar el desarrollo del control de una mano protésica que mediante una red neuronal artificial controla un sistema de cinco movimientos realizado a través de Matlab (Ángel-López & Arzola de la Peña, 2017), por otro lado las prótesis de mano se controlan mediante potencial de acción muscular, este método es uno de los más importantes y que ha ganado campo en el desarrollo de los dispositivos protésicos actuales.

Las prótesis resultantes de las bioseñales musculares son las que han generado mayor campo

en la medicina actual, también conocidas como prótesis biónicas son las que tienen una mayor exposición en el mercado. La tecnología de los dispositivos protésicos de este tipo facilita la interacción con el usuario, además de tener un porcentaje de precisión elevado (Yatsun et al., 2024).

En la actualidad existen distintas compañías al rededor del mundo que han innovado las prótesis, entre las cuales tenemos en Alemania Ottobock, en Nueva Zelanda Taska, Estados Unidos LTI y Motion Control, RSL Steeper en Gran Bretaña, en Rusia Motorika (Yatsun et al., 2024).

2.2.1. Prótesis de miembros superiores

Las prótesis de miembro superior son dispositivos biomeédicos que tienen el objetivo de restaurar las funciones del miembro superior, generalmente su mayor campo actual son aquellos desarrollados para el órgano de la mano (Yatsun et al., 2024).

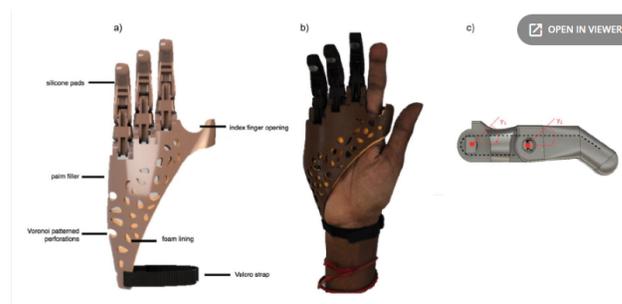
Del porcentaje de personas con discapacidad de distintas partes del cuerpo el 30 % son de miembro superior (de Oliveira de Souza et al., 2018), de los cuales el 90 % representan personas con afecciones en el miembro superior con amputaciones parciales (Choi et al., 2023).

La cantidad de personas con discapacidades de las manos es un número elevando, por lo que el desarrollo de estos dispositivos son de gran importancia, porque permite compensar y mejorar la calidad de vida de un porcentaje significativo de la población.

Existen distintos tipos de prótesis de manos entre los principales tenemos las prótesis de manos pasivas o estéticas determinadas así debido a que no cumplen funciones propias de la mano y son meramente estilizantes, por otro lado tenemos prótesis activas entre las más populares se encuentran las prótesis mioeléctricas, además de dispositivos electrónicos y mecánicos (Choi et al., 2023).

En el campo de desarrollo de dispositivos protésicos uno de los principales objetivos es la búsqueda de el aumento de los grados de libertad de las prótesis, además del desarrollo de la capacidad del sistema de replicación de movimientos, este propósito permite la creación de tecnología nueva en el área de la biomédica, es importante destacar que estos dispositivos se encuentran mayormente orientados a la solvencia de problemáticas asociadas a amputaciones transhumerales y transradiales.

Figura 2-6.:
Prótesis de mano.



Nota. Imagen prótesis. Adaptado de (Alturkistani et al., 2020).

Tipos de prótesis

Los tipos de prótesis se encuentran determinados por su capacidad de funcionamiento, tenemos dos grandes grupos entre los cuales se clasifican, prótesis activas se caracterizan por establecer un rango de funcionamiento con la finalidad de solventar las capacidades perdidas de los usuarios con problemas de movilidad, como segundo punto tenemos las prótesis pasivas que se encuentran determinadas por su función en rango estético, no contribuye a la pérdida de las capacidades; sin embargo, se establece como un marco de solvencia en la apariencia de la mano mayormente de personas con amputaciones (Kumar et al., 2023).

Dentro de las prótesis activas tenemos diferentes tipos de dispositivos, divididas de acuerdo a el método de control.

1. Las prótesis neumáticas se caracterizan por trabajar en base a la presión del aire comprimido (Geovanny, 2019). El aire comprimido permite la regulación y el control de los movimientos de la mano, entre los principales elementos que son parte de este tipo de dispositivos se encuentran los cilindro neumáticos, las válvulas desarrolladas con el fin de controlar la cantidad de aire emitido, además de la fuente de aire comprimido normalmente entre una bomba manual o un compresor.

Se caracterizan principalmente por encontrarse entre los dispositivos que tienen un índice de precio más económico, además de presentar un menor peso; sin embargo, también son más imprecisos y por su naturaleza necesitan una mayor cantidad de atenciones de mantenimiento.

2. Prótesis eléctricas: se caracterizan por trabajar en base a electricidad (Geovanny, 2019). Estos dispositivos son los más desarrollados en la actualidad.

El funcionamiento de las prótesis eléctricas son fundamentadas en la emisión de electricidad para el control de actuadores, con el fin de delimitar el movimiento producido por la prótesis, normalmente el control se realiza mediante sensores o programación, entre sus principales ventajas se encuentra la precisión de los movimientos ejecutados.

Prótesis por bioseñales son un subgrupo de las prótesis eléctricas su funcionamiento proviene de la emisión de señales del cuerpo humano, principalmente potencial eléctrico de los músculos. La electromiografía es una herramienta fundamental en este tipo de prótesis.

Las bioseñales del cuerpo detectadas mediante electromiografía o EMG, se realiza con la recepción de la señal por electrodos conectados a el usuario, con el fin de lograr la detección del potencial eléctrico emitido por los músculos que actúan en un movimiento.

Su principal característica es la capacidad de control que le brinda al usuario, debido a que establece un nivel de naturalidad a los movimientos; sin embargo, presenta problemas en cuanto al ruido por los electrodos y a la facilidad de uso.

3. Prótesis mecánicas: se caracterizan por funcionar en base a mecanismos. Los dispositivos protésicos mecánicos fueron los primeros en surgir debido a que no necesitaban la emisión de señales eléctricas ni neumáticas, únicamente surgen a partir de componentes como poleas, sistemas de movimientos, cables, entre otros.

Entre los beneficios y desventajas que presentan se encuentran una menor precisión en el control de los movimientos y también presentan una duración mayor a lo largo del tiempo.

2.3. Visión artificial

La visión artificial es una rama de estudio que ha surgido en el campo de la ingeniería, ha permitido que la interacción entre las máquinas y el entorno visual se relacionen, es decir, permite la interpretación de imágenes y vídeos para sistemas computacionales.

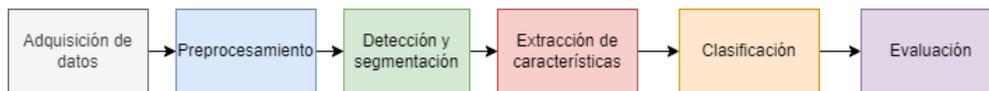
La interacción humano-computadora en el contexto de la visión artificial, se realiza mediante capturadores de imágenes es decir dispositivos que permiten la entrada de imagen y vídeo por ejemplo la cámara, las imágenes obtenidas pasan por su posterior procesamiento, de acuerdo a la tecnología usada también se puede optar por un entrenamiento con el fin de permitir una comunicación en el lenguaje que la computadora puede procesar e interpretar, en base a esta herramienta, es posible la creación de mecanismos para distintos proyectos.

La visión artificial utilizada en el presente proyecto de titulación se fundamenta en redes neuronales convolucionales también conocidas como CNN, además también funciona mediante técnicas de atención y la conexión de salto (Lei et al., 2024), las redes neuronales convolucionales han permitido que el desarrollo de esta herramienta, con el fin de establecer su crecimiento dando paso a una precisión más elevada en las funciones propias de este método.

Las funciones para el proceso de visión artificial se basan en la clasificación de imágenes, además de la identificación y reconocimiento de objetos y patrones y la segmentación semántica (Lei et al., 2024) o por clasificación.

El proceso cotidiano de la visión artificial es el que se ilustra en la figura 2-7.

Figura 2-7.:
Diagrama visión artificial.



Nota. Imagen diagrama de bloques visión artificial.

Aquisición de imágenes: La adquisición de imágenes, se realiza bajo herramientas de captura de imágenes, como las cámaras estereostópicas (binoculares es decir con dos lentes), cámaras monoculares (capturadores de imágenes con un solo lente) Qi et al., 2024a, además de la captura en RGB es decir tres colores rojo, verde y azul o en blanco y negro, además de sensores, que captan imágenes o videos en tiempo real o mediante grabación.

La adquisición de imágenes es de gran importancia, debido a que sus características de funcionamiento, determinarán en gran parte la capacidad del sistema en realizar las funciones de la visión artificial.

Preprocesamiento: Se realiza el preprocesamiento de la imagen para mejorar la calidad de las imágenes adquiridas. Los preprocesamientos comúnmente conocidos son los siguientes

- **Escala de grises:** Se realizó la transformación de las imágenes a color a escalas de grises para reducir el procesamiento y minimizar requisitos del procesador (Qi et al., 2024b).
- **Suavizado:** Fundamentalmente sugiere la aplicación de filtros con la finalidad de eliminar el ruido presente en las imágenes.

- **Detección de bordes:** La detección de bordes se realiza mediante los filtros Sobel (filtro de procesamiento de imágenes diseñado para la detección de bordes de acuerdo a la variación de intensidades) y Canny (técnica de detección de bordes que mejora el filtro Sobel) (Qi et al., 2024b), con el fin de ubicar y delimitar el área correspondiente a un objeto.
- **Operaciones morfológicas:** Entre las principales tenemos la erosión, expansión, apertura y cierre.

Detección y segmentación: Determina específicamente la presencia del objeto a detectar por la visión artificial, se lo realiza mediante algoritmos específicos como Mediapipe, SSD, YOLO, entre otros. La segmentación se realiza como un método de separación del objeto de interés del fondo (Qi et al., 2024b), permite la facilitación de reconocimiento.

Extracción de características: la adquisición de rasgos de la imagen y de patrones específicos del objeto de detección se basan en la obtención de la forma, disposición de elementos. Las características que se extraen son aquellas que delimitan la identificación de un objeto.

Clasificación: En base a las características extraídas se puede agrupar a la imagen y establecer dentro de un marco de identificación. La clasificación se realiza bajo distintos métodos detallados a continuación.

- **Comparación:** La clasificación se realiza mediante la comparación entre la imagen y una plantilla de referencia, además se realiza principalmente en imágenes estáticas. (Qi et al., 2024b)
- **Información geométrica:** Básicamente es un sistema que delimita la clasificación mediante el centro y las distancias entre cada punto de comparación. Un claro ejemplo es la punta de los dedos, y las coordenadas de posición, además de las distancias entre el centro de gravedad hasta un punto distal.
- **Aprendizaje automático:** Aborda el tema de bases de datos, además de establecer el reconocimiento de una computadora mediante modelos de inteligencia artificial.

Redes neuronales: Las redes neuronales convolucionales son herramientas de aprendizaje automático, se caracterizan por simular el comportamiento de las neuronas humanas, funcionan mediante el entrenamiento por bases de datos. (Qi et al., 2024b)

Evaluación: La comprobación del reconocimiento se realiza mediante la comprobación de la precisión, exactitud, y pruebas de funcionamiento. (Qi et al., 2024b)

2.3.1. Reconocimiento de manos mediante Mediapipe

El reconocimiento de las manos y del patrón de movimiento para el proyecto de control de movimiento de los dedos de una prótesis de mano es el punto fundamental e indispensable del proyecto, debido a que es la base para la elaboración del mismo, gracias a la determinación de los patrones de movimientos dactilares se permitirá la replicación, lo que a su vez permitirá el control.

La identificación de la mano para la visión artificial mediante la cámara del ordenador, se basa en el reconocimiento y distinción de las características puntuales de la mano, debido a que de esta manera, se logrará la validación de los puntos de reconocimiento para distinguir posiciones de las estructuras dactilares, además de la palma. (Sánchez-Brizuela et al., 2023)

MediaPipe es una plataforma desarrollada mediante machine learning, este framework (marco de trabajo) utiliza redes neuronales para la visión artificial con la finalidad de desarrollar algoritmos de reconocimiento de objetos, caras y manos. MediaPipe tiene en específico la capacidad de detección de puntos clave de la mano, la palma y dedos. (Sánchez-Brizuela et al., 2023)

El funcionamiento de MediaPipe se centra en la creación de pipelines que son módulos de procesamiento entre los reconocimientos más importantes se encuentran la detección de rostro, manos, objetos, entre muchos otros. MediaPipe es una herramienta desarrollada por Google.

En cuanto al procesamiento modular de MediaPipe para la detección de la mano tenemos el proceso que ocurre desde la captura de la imagen, mediante cámaras de video, además de un preprocesamiento de imágenes, por otro lado tenemos el uso de una red neuronal propia del sistema, se caracteriza por ser precisa.

Los puntos clave de la mano mediante Mediapipe se originan mediante coordenadas en dos dimensiones, en referencia a el espacio de detección de la imagen. Los puntos de la detección de la mano son en total 21. (Sánchez-Brizuela et al., 2023)

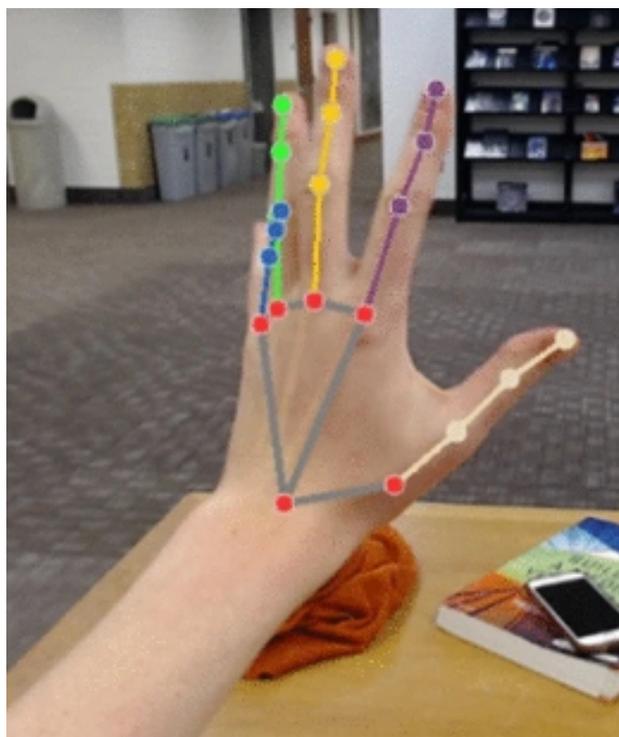
Es importante destacar que dentro de los puntos clave, también está la profundidad, que se encuentra delimitada por el punto de la muñeca, los planos en los que se maneja una imagen son x que representa ancho, y largo y el plano de z correspondiente a profundidad. Sánchez-Brizuela et al., 2023.

MediaPipe es una herramienta que permite la creación de algoritmos para el aprendizaje automático, es decir el uso de inteligencia artificial para el desarrollo de sistemas por visión

artificial.

Las principales aplicaciones de MediPipe en la visión artificial están delimitadas por la capacidad del algoritmo que se desarrolle en base a esta herramienta, en específico tenemos el control de equipos mediante gestos, realidad aumentada, además de desarrollar eficientemente la capacidad de interacción entre los dispositivos y las personas. Las principales áreas de uso de MediPipe se encuentran en la ingeniería destacando su uso en los sistemas computacionales, telemedicina, seguridad, educación y la robótica.

Figura 2-8.:
MediaPipe 21 puntos.



Nota. MediaPipe 21 puntos. Adaptado de (Sánchez-Brizuela et al., 2023).

En la imagen 2-8 se presenta la ubicación de 21 puntos mediante MediaPipe.

3. Metodología

En base al proceso de desarrollo del sistema de seguimiento del movimiento de los dedos mediante algoritmos de visión artificial para el control de una prótesis de mano, podemos indicar la metodología utilizada, a partir de la propuesta.

3.1. Metodología de investigación

La metodología de investigación para el desarrollo del proyecto propuesto fue cuantitativa debido a que permitió generar resultados numéricos en las pruebas de funcionamiento, exploratoria debido a la investigación realizada en el estado de arte y a la indagación sobre las técnicas para el desarrollo del presente proyecto, descriptiva gracias al detalle de la explicación sobre el proceso de metodología. Deductiva, debido a que partió desde la premisa propuesta en base a una problemática, además del estado del arte, por lo tanto se dedujo la solución, planteada en como el control de los movimientos de los dedos de una prótesis de mano mediante el uso de la visión artificial.

La investigación del proyecto fue cuantitativa, además de exploratorio y descriptiva, en primer lugar considerado cuantitativo debido a que los resultados obtenidos son de índole numérica y medibles sobre las pruebas de efectividad del control de la prótesis, de acuerdo a la variación de la cantidad de luz, las dimensiones de la mano y las tonalidades de piel, además de realizar una investigación exploratoria debido a la búsqueda del marco teórico, desde donde surgió la propuesta del proyecto, en último lugar fue descriptivo, debido a que se detalló el proceso de control de la prótesis de mano, mediante programación, específicamente visión artificial.

3.2. Metodología del proceso

En la presente sección se indica el proceso de diseño del proyecto sobre el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano mediante visión artificial, en base a el desarrollo del mismo podemos indicar la estructura del proceso en las siguientes etapas:

1. **Recopilación de datos:** En este nivel se pretende la recolección de información relevante sobre el proyecto en base a la búsqueda del estado del arte, con la finalidad de establecer antecedentes, conceptos clave y métodos para la realización del proyecto intitulado control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano.
2. **Identificación de técnicas:** Proceso de identificación de los métodos de visión artificial utilizados para el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano, mediante python y la comunicación serial en Arduino.
3. **Generación de algoritmos:** Desarrollo de algoritmos mediante el uso de programación en lenguaje python con técnicas referentes a la visión artificial, para generar programas para el control del movimiento de los dedos de un modelo de prótesis de mano, además de establecer la comunicación serial con los actuadores.
4. **Pruebas de funcionamiento:** Realizar distintas pruebas de funcionamiento, para determinar la efectividad del control, específicamente modificando el estado de captura de vídeo por la variación de lúmenes, además de analizar la capacidad de respuesta del sistema ante la variación de usuarios diversos, y pruebas de ruido y oclusiones.
5. **Análisis de resultados:** analizar los resultados obtenidos, para identificar la efectividad del control de prótesis, con la finalidad de delimitar un método de control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano, mediante visión artificial, obteniendo conclusiones.

3.2.1. Recopilación de datos

Las prótesis de manos han sido un importante avance en la medicina, debido a que permiten solventar los problemas relacionados con la falta de un órgano, en específico las prótesis de miembro superior representan un amplio porcentaje de los dispositivos protésicos utilizados.

En cuanto a los avances de las prótesis de mano podemos destacar la tecnología que actualmente se utiliza en base a la electromiografía EMG, miografía de fuerza FMG y mecanomiografía o MMG según Prakash et al. (2022), estas técnicas se destacan por utilizar el potencial de acción muscular.

Las problemáticas referidas a el EMG, FMG Y MMG se basan en la introducción de ruido emitido por el ambiente, además de depender directamente de la capacidad de los electrodos, por otro lado costos muy altos de elaboración Prakash et al. (2022), por lo que el desarrollo de métodos de control distintos es de gran importancia, debido a que brinda un enfoque diferente.

3.2.2. Identificación de técnicas

A continuación se detalla específicamente los métodos utilizados en la elaboración del presente proyecto de titulación.

Materiales, equipos y softwares

Tabla 3-1.:
Equipos y software.

Equipos, software y materiales	Descripción
Computadora	Dispositivo electrónico capaz de procesar información y realizar tareas automatizadas mediante la ejecución de programas o instrucciones.
PyCharm Community Edition	Entorno de desarrollo, específicamente para lenguaje Python.
Arduino IDE	Entorno de desarrollo, específicamente para la comunicación con el microcontrolador Arduino, desarrollado en lenguaje C/C++.
Arduino Uno	Microcontrolador, desarrollado en lenguaje C/C++.
Servomotores MG995	Actuadores que se mueven en base al funcionamiento de un motor, en grados.
Fuente de alimentación	Fuente de corriente a 5 voltios para la alimentación de los servomotores.

Nota. La tabla muestra los equipos y software utilizados en el proyecto de titulación.

Computadora

El ordenador utilizado para la visión artificial fue el modelo de laptop de la marca Dell con tecnología icore 5, del modelo latitude E7450, este dispositivo se caracteriza por tener un rápido procesamiento, además de permitir el manejo de la visión artificial correctamente, además posee una cámara con una descripción de 0.9 MP o megapíxeles, la resolución de la cámara es de 1280 x 720 píxeles, lo que permite una captura de la imagen acorde a lo requerido por la visión artificial.

El procesador del ordenador es el core i5 lo que permite la tecnología necesaria para el desarrollo de algoritmos de visión artificial.

La salida del ordenador emite un voltaje de 5 voltios y 500mA, por lo cual la comunicación del Arduino con la computadora solamente requiere de un cable USB.

Pycharm Community Edition

Pycharm community edition es una plataforma de desarrollo del lenguaje python, mediante el cual se desarrollan algoritmos programados, entre los proyectos que se pueden realizar con este lenguaje de programación tenemos la visión artificial. En el desarrollo del control de una prótesis de mano mediante visión artificial, el uso de python fue indispensable, debido a que se desarrollo la programación de los algoritmos de control bajo esta plataforma, además del uso de distintas librerías y herramientas propias del lenguaje.

Entre las librerías utilizadas exclusivamente para la visión artificial tenemos Open cv desarrollado como una biblioteca de python para la visión artificial además del permitir el procesamiento de imágenes y video, conjuntamente con Open Cv se utilizó la herramienta de MediaPipe desarrollada en base a las redes neuronales, mediapipe fue creada por Google, con la finalidad de establecer el reconocimiento de estructuras faciales, objetos y el reconocimiento de manos.

Arduino IDE y Arduino Uno

Aduino IDE es un entorno de desarrollo de programas para placas de Arduino, desarrollado en C/C++, entre sus funciones se encuentran la edición de código, compilador, la carga de programas a las placas, además de incluir bibliotecas con distintas funcionalidades, y el monitor serial.

Figura 3-1.:
Arduino Uno.



Nota. Imagen de Arduino Uno.

El Arduino Uno, es un microcontrolador desarrollado en base a ATmega328P, se caracteriza por tener 14 pines digitales y 6 pines analógicos, su alimentación funciona con 5 voltios,

además de permitir la salida de 5 v, 3.3v, y tierras o gnd.

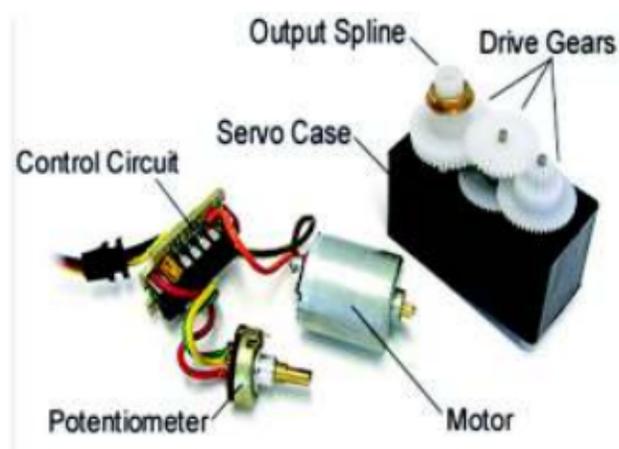
El uso de Arduino IDE y Arduino Uno, fue esencial, debido a que en esta parte se realizó la comunicación serial, entre la visión artificial en python con el control para los servomotores en Arduino Uno. Es importante destacar que Arduino Uno utilizó las librerías servo para el control de los servomotores MG995, entre las fases del programa realizado en esta plataforma se encuentra el control de los servomotores, y la comunicación serial en el puerto COM, lo que sitúa un intercambio entre Python y Arduino Uno.

Sevomotores

Los servomotores utilizados son el modelo MG995 desarrollados por la empresa Tower Pro según, dentro de sus características principales, podemos indicar que tiene un par de torsión que va desde los 9.4kg/cm a los 11kg/cm. (Geovanny, 2019)

Figura 3-2.:

Servomotor.



Nota. Imagen servomotor MG995. Adaptado de (Prometec, s.f.).

Los servomotores utilizados son controlados mediante PWM o también conocido como modulación por ancho de pulso, este método de control para los servomotores se realizó mediante Arduino uno, que a su vez interactúa directamente con la visión artificial en Python, mediante la comunicación serial.

Se caracterizan también tener un control en ángulos, para el presente proyecto se trabajó en un rango de 0 a 180 grados (Geovanny, 2019), mediante el PWM se controla los ángulos de funcionamiento de los servomotores, es decir de acuerdo a la señal existe la variación de

niveles de angulación dentro de los rangos.

Los servomotores MG 995 se controlan mediante un motor de corriente continua, este mecanismo al aplicarse la alimentación se produce el movimiento mediante una alta velocidad y un par de torque generalmente bajo. El par de toque generado al ser muy bajo necesita incrementarse mediante mecanismo como engranajes, en donde ocurre la transformación de la velocidad en torque (Geovanny, 2019).

El circuito de control funciona en base a la recepción de señales, de acuerdo a esta recepción se ajuste el nivel de rotación de los mecanismos, por otro lado también tenemos el potenciómetro que funciona en base a la retroalimentación de la posición del eje del servomotor, es decir actúa como un sensor del nivel de rotación.

Los servomotores se encuentran constituidos por tres entradas, uno de voltaje, gnd o tierra y la entrada destinada para la señal de control generalmente en amarillo (Geovanny, 2019).

Los servomotores MG 995 se caracteriza por necesitar una alimentación de 4.8 a 7.2 voltios, además de una corriente desde 500mA a 900mA; sin embargo en picos puede llegar a consumir como máximo 2.5A, por lo tanto el uso de una fuente de corriente es necesaria para el funcionamiento de los servomotores en óptimas condiciones.

Alimentación

La alimentación del proyecto para el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano, mediante visión artificial, se divide en dos partes.

- Microcontrolador: Necesita una alimentación de 5v a 500 mA, por lo tanto se puede realizar mediante un cable USB desde el ordenador que ofrece los estándares para la alimentación.
- Servomotores: La alimentación de los servomotores MG995 necesita una fuente de corriente externa según las especificidades del fabricante, debido a que el consumo de corriente va desde los 500 a los 900mA, por lo tanto para un total de cinco servomotores se necesita de 2.5 a 4.5 Amperios.

La fuente utilizada para el proyecto ofrece un nivel de 5 voltios a 20 Amperios, por lo cual la alimentación se encuentra bajo los rangos estimados.

Para la alimentación del sistema se conectó la fuente de 5v y 20A directamente a los servomotores, además de realizar un puenteo con las tierras de los equipos, es decir la conexión en el mismo punto en común entre la tierra del arduino, el gnd de los servomotores y la tierra

de la fuente.

3.2.3. Generación de algoritmos

La programación realizada se divide en dos secciones, la realización de la visión artificial en python y la comunicación serial para el control de los servomotores en arduino.

Librerías e importaciones

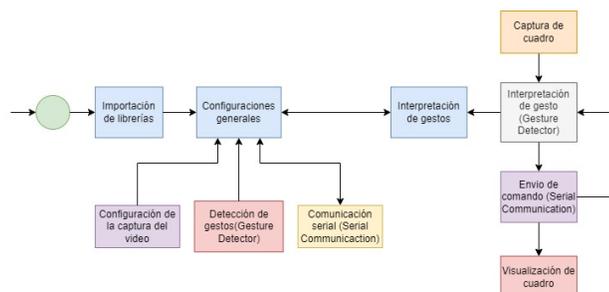
- Open cv, que se importa en la primera línea con el comando cv2, se caracteriza por permitir el manejo de las imágenes y la captura del vídeo.
- La importación de la librería Serial con la finalidad de la comunicación serial(acceso a puertos seriales, comunicación).
- Librería Numpy principalmente para el manejo de matrices, en la línea uno.
- Desde typing se importa List, Tuple, que tienen la función de realizar anotaciones de tipos en el lenguaje de python.
- El código utiliza las librerías math para operaciones matemáticas
- MediaPipe que es una librería desarrollada por Google para visión artificial,
- Librería time operaciones en el tiempo. serial.
- La librería servo son necesarias para el manejo de los servomotores por arduino en específico el control.

Código utilizados

Código principal

A continuación se presenta el diagrama de funcionamiento del código principal intitolado main.py, se encuentra en el anexo A.

Figura 3-3.:
Código main.



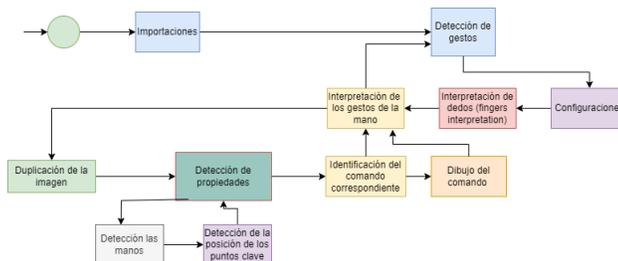
Nota. Diagrama de bloques código anexo A.

El código presentado detalla la estructura principal de la visión artificial, este código funciona en base a importaciones desde el resto de los códigos interconectas desde la captura de la imagen por video, la comunicación serial y la detección de los gestos de la mano, específico se crea una clase llamada ManoControl, además de la captura del video mediante la cámara por defecto de la laptop.

Detección de gestos: código principal

A continuación se presenta el código principal sobre la detección de gestos, código en el Anexo B.

Figura 3-4.:
Código detección de gestos.



Nota. Diagrama de bloques código anexo B. Autoría propia.

Se crea una clase llamada GestureDetector que indica un umbral de sensibilidad para la validación de la detección de la mano, además del dibujo de las funciones en base a la detección de los gestos de la mano, también se establece una matriz que para la detección de los puntos de la mano, además de asignar un patrón a la representación de un movimiento,

se les asigna por lo tanto a cada movimiento una letra. El principio e funcionamiento de la matriz es binario si un comando es llamado a enviarse por comunicación serial se plantea como uno caso contrario como cero, existen en total 11 combinaciones programadas.

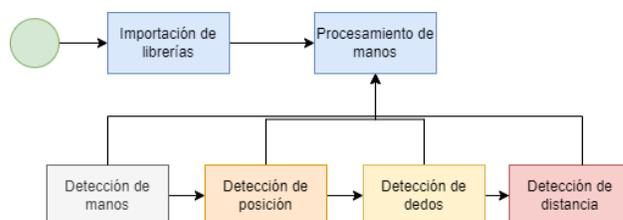
En el código se establece la presencia e 21 puntos correspondientes a una mano completa según Mediapipe esto con la finalidad de determinar cuantos dedos se encuentran levantados.

Detección de propiedades

El código se presenta en el anexo C

Figura 3-5.:

Código detección de propiedades.



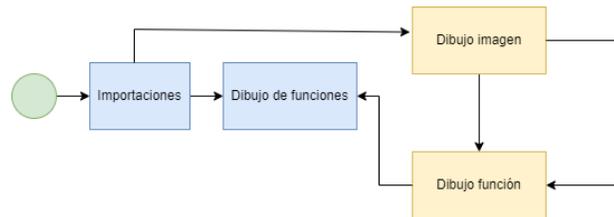
Nota. Diagrama de bloques código anexo C.

En el código se define el modo de captura de la imagen en forma de video, además de establecer la cantidad de manos a detectar, el acceso a la librería Mediapipe en específico al módulo de manos representa especificaciones que se extraen de Mediapipe, además de utilizar la función de dibujo, y representar la asignación numérica de la punta de los dedos, también la detección de las coordenadas en el plano 'x' y en el plano 'y'.

Dibujo de las funciones

En el anexo D, podemos a su vez observar el paso del proceso del dibujo de funciones, específicamente en la toma de decisiones de la acción a dibujar, como podemos ver en el diagrama a continuación.

Figura 3-6.:
Código de dibujo de funciones.

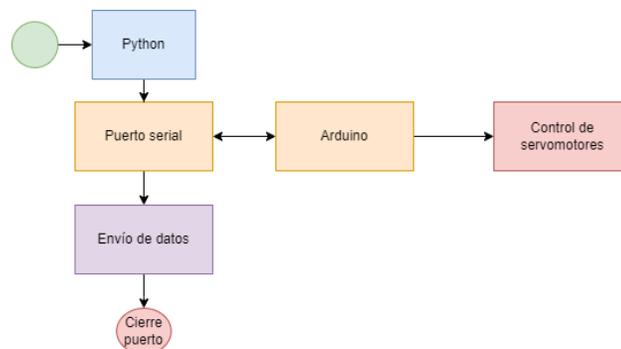


Nota. Diagrama de bloques código anexo D.

En el código presentado tenemos principalmente el uso de realiza mediante numpy, el dibujo de la mano en acción se representa en una matriz con altura, ancho y los canales(RGB), mediante el cual se permite mapear una acción en específico de la mano, si la acción se detecta procede a dibujar.

Código: comunicación serial

Figura 3-7.:
Código de comunicación.



Nota. Diagrama de bloques código anexo E y F.

Código: comunicación serial python

El código se destina para determinar la velocidad de comunicación serial, se presenta una velocidad de 9600 baudios, además del puerto COM y el tiempo de comunicación, también desarrolla el envío de los comandos mediante el puerto serial, tenemos 11 comandos que coinciden con los comandos de la detección de manos. Se encuentra en el Anexo E

Comunicación serial Arduino

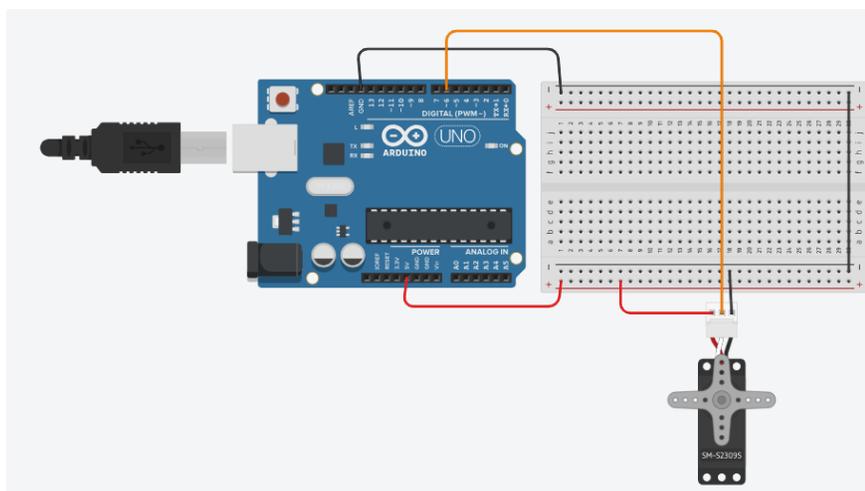
La comunicación serial, además de asignar un pin de control de los servomotore establece la comunicación por el puerto serial, si existen datos se almacenan después de acuerdo a el caso especificado se realiza una acción en específico para cada servomotor y para cada configuración de movimientos, esto de acuerdo a la configuración serial de python, en total se estableció 11 movimientos. Se encuentra en el anexo F.

Es importante destacar que los ángulos de los servomotores se configuraron de acuerdo a el rango de movimiento de cada dedo, en un rango de 0 a 180 grados, debido a la capacidad de los servomotores.

3.3. Implementación física

La implementación física se efectuó en base a la simulación sobre los servomotores y arduino, a continuación se presenta el sistema en thinkercad.

Figura 3-8.:
Simulación servomotor.



Nota. Simulación realizada en thinkercad, sobre el control de los servomotores MG995.

La configuración de los cinco servomotores fue realizada en los pines 2,3,4,5 y 6, además de la implementación con la una fuente de amperaje externa, debio a las especificaciones de los servomotores descritas anteriormente.

Prótesis de mano

A continuación se presenta la prótesis utilizada en el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano mediante visión artificial.

Figura 3-9.:

Prótesis de mano para el control por visión artificial.



Nota. El dispositivo protésico utilizado en el presente trabajo de titulación.

Figura 3-10.:

Sistema implementado.



Nota. El dispositivo protésico implementado conjuntamente con la visión artificial.

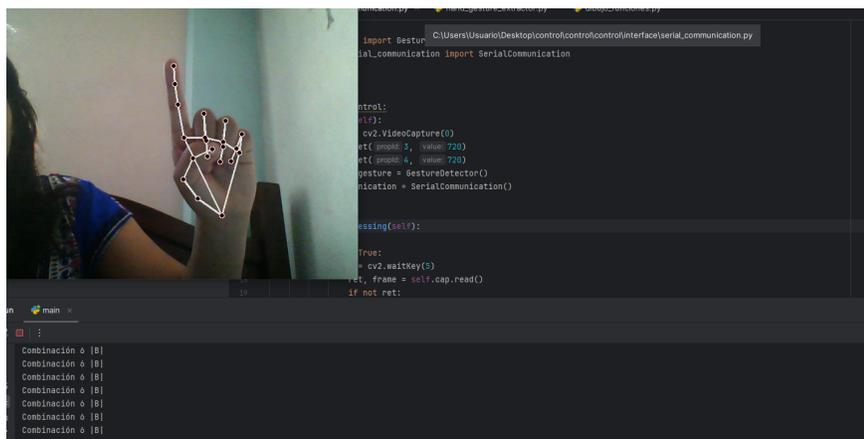
En la figura 3-10 se presenta la incorporación de un servomotor MG995, en base a esta simu-

lación se realizó el proceso de incorporación del código en la prótesis de mano, que contiene 5 servomotores MG995.

Visión artificial

En cuanto a la implementación de la visión artificial, en la pantalla generada por la imagen en movimiento de las manos, se dibuja la posición de los nodos de la mano, a continuación se presenta el resultado en python.

Figura 3-11.:
Visión artificial en python.



Nota. Visión artificial en python en envío del comando B.

4. Resultados

4.0.1. Resultado del proyecto

El proyecto del control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano arroja resultado acorde a el planteamiento del proyecto, debido a que se logró establecer el control del dispositivo protésico con una regulación de 11 movimientos.

Movimientos

1. Movimiento de extensión del pulgar.
2. Movimiento de extensión del índice.
3. Extensión del dedo medio.
4. Extensión del dedo anular.
5. Extensión del dedo meñique.
6. Extensión del pulgar, y el índice.
7. Extensión del índice y el dedo medio.
8. Extensión del índice, medio y anular.
9. Extensión de los dedos pulgar, índice, medio, anular y meñique.
10. Flexión de los dedos pulgar, índice, emdio, anular y meñique.
11. Extensión del dedo pulgar, índice, medio.

Es importante destacar que la combinación de los movimientos gestionados se realizó en base a la búsqueda de naturalidad en los dedos, además de la determinación de la jerarquía de la importancia de los movimientos.

4.0.2. Criterios para las pruebas de funcionamiento

En cuanto a la variación de manos podemos indicar que las pruebas de funcionamiento a realizar son en base a la variación de la tonalidad de piel del participante, además de características como la edad, sexo, tamaño de la mano.

Tonalidad de piel

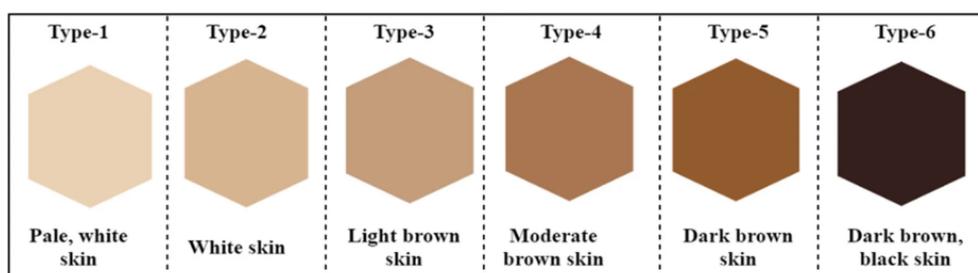
La clasificación por la tonalidad de la piel se basa en la categorización de Fitzpatrick (Shaik & R, 2024), que indica 6 tipos de piel acorde a su variación de tonalidad.

Tabla 4-1.:
Clasificación de tipos de piel

Nombres	Tipos
Piel blanca pálida	Tipo 1
Piel blanca	Tipo 2
Piel marrón claro	Tipo 3
Piel morena moderada	Tipo 4
Piel marrón oscuro	Tipo 5
Piel oscura	Tipo 6

Nota. La tabla muestra la clasificación de los tipos de piel.

Figura 4-1.:
Clasificación Fitzpatrick de tipos de piel



Nota. Imagen de la clasificación Fitzpatrick. Adaptado de Shaik y S R (2024).

En la figura 4-1 se presenta una representación visual sobre la clasificación de Fitzpatrick para las tonalidades de piel, en donde el tipo I es el más claro y el tipo VI el más oscuro,

existen distintos criterios de clasificación en específico tomando en cuenta las características y comportamientos de la piel.

La piel blanca pálida se caracteriza por tener una tonalidad más clara en comparación al resto de tonalidad, teniendo un subtono rosado, el tipo es una piel blanca con un tono marrón muy tenue de fondo, el tercer tipo también conocido como piel marrón clara se caracteriza por tener una prevalencia del color marrón más presente que el tipo 2, el tipo cuatro piel morena moderada tiene la característica de broncearse y no quemarse con facilidad su rango según Fitzpatrick es de 21 a 27(Shaik & R, 2024), el tipo 5 tiene la presencia del color marrón marcado o marrón oscuro, el tipo 6 también conocido como piel negra no se quema por lo general y tiende a un color marrón oscuro o negro.

Edad, Sexo y dimensiones

En cuanto a la variable de edad, sexo y dimensiones, se pretende realizar las pruebas en base a la variación de las manos para las pruebas de control, esto debido a la diversidad entre diferentes edades y sexos de los usuarios, es importante destacar que gracias que el cambio de edades se puede modificar características como el tamaño longitud y el ancho.

Los sexos son masculino y femenino, y los rangos de edad comprenden entre infantes entre los 7 a 12 años, adolescentes entre los 13 a los 17 años, adultos jóvenes entre los 18 a los 22, adultos entre los 22 a los 65 años, y personas de la tercera edad de 65 años en adelante.

Variación de iluminación

La iluminación se refiere a una medida que se utiliza para establecer la cantidad de luz emitido por un sistema o existente en el ambiente (Ozenen, 2024). La iluminación generalmente se mide en luxes.

En la visión artificial la medición de los luxes es de gran importancia, debido a que el sistema en general depende de la cantidad de luz que recepta la cámara del dispositivo, de acuerdo a la sobre iluminación o por lo contrario la falta de iluminación el sistema tiene una efectividad mayor o menor.

4.0.3. Base de datos

En cuanto a la base de datos utilizados para las pruebas de funcionamiento se detallan en la tabla adjunta a continuación, en donde tenemos criterios como el número de individuo destinado para el reconocimiento del usuario de la prueba, además del sexo de participante, la edad, tamaño de las manos y el tono de piel.

Es importante destacar que la base de datos se obtuvo gracias a la recolección de información y prueba de diez personas voluntarias de distintas edades, sexos, y con características distintas acorde a su mano.

Tabla 4-2.:
Base de datos

No de individuo	Sexo	Edad (años)	Tamaño de la mano	Tono de piel
1	Masculino	17	22 cm	Tipo II
2	Masculino	11	14.5 cm	Tipo IV
3	Femenino	18	16.8 cm	Tipo III
4	Masculino	50	18.5 cm	Tipo II
5	Femenino	50	17.6 cm	Tipo IV
6	Femenino	21	17 cm	Tipo III
7	Femenino	94	17.2 cm	Tipo I
8	Femenino	60	16.8 cm	Tipo III
9	Masculino	57	19 cm	Tipo V
10	Masculino	10	14.7 cm	Tipo I

Nota. La tabla muestra la base de datos tomada para las pruebas de funcionamiento.

En la base de datos detallada en la tabla 4-2 encontramos la diversidad de los datos de las pruebas de funcionamiento, esto con el fin de permitir resultados más precisos.

4.0.4. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento realizadas son en base a la medición de luxes en la detección de los movimientos mediante la cámara en distintos escenarios, además del testeado de la capacidad de replicación de los movimientos de acuerdo a la variación de las manos por su tamaño es decir su longitud en centímetros y el color de piel. La finalidad de las pruebas de funcionamiento son establecer el rango de control del sistema en donde el espectro permite

la captura de la imagen y el funcionamiento de la visión artificial, específicamente con la finalidad de establecer las características en las cuales el proyecto funciona con mayor efectividad, y cuando representan una falla en el sistema.

Prueba de variación del tamaño de la mano

La variación de las manos se realizará bajo las pruebas en distintos el tamaños de la mano recolectados desde la base de datos de los voluntarios, con la finalidad de establecer el rango óptimo de funcionamiento de la visión artificial para el control del movimiento de los dedos de una prótesis de manos.

A continuación se presenta los resultados obtenidos en base a el control del movimiento de los dedos de acuerdo a las dimensiones.

Tabla 4-3.:
Resultados de variación de tamaño

Individuo	Tamaño	Algoritmo 2	Algoritmo 4	% Replicación
1	22.0	10/10	9/10	95 %
2	14.5	9/10	9/10	90 %
3	16.8	10/10	10/10	100 %
4	18.5	10/10	10/10	100 %
5	17.6	10/10	10/10	100 %
6	17.0	10/10	10/10	100 %
7	17.2	10/10	10/10	100 %
8	16.8	10/10	10/10	100 %
9	19.0	10/10	10/10	100 %
10	14.0	8/10	9/10	85 %

Nota. Tabla resultados de variación del tamaño de la mano

Las pruebas de funcionamiento realizadas arrojan resultados asociados al porcentaje de replicación de acuerdo a la capacidad del sistema de funcionar en base a el discriminante de tamaño, entre los resultados podemos identificar una falla en las manos muy pequeñas de alrededor de 14 cm y las manos al extremo del rango muy grandes, en donde con 22 cm se encontró un porcentaje de funcionamiento del 95 %, por lo cual se puede determinar que en cuanto al tamaño el rango de funcionamiento óptimo va desde los 16.8cm a los 19 cm.

Prueba de variación de tonalidades de piel

El criterio para la variación de las manos se basa en la tabla de Fitzpatrick para las tonalidades de la piel, en donde existe una variación de seis tonalidades, siendo el tipo I la piel más clara, y el tipo VI una tonalidad oscura.

A continuación se presenta la tabla 4-4 relacionada a los resultados de la replicación de algoritmos acorde a la variación de los tipos de piel, en el anexo H se presenta el consentimiento informado de los participantes que forman la base de datos .

Tabla 4-4.:
Resultados de la replicación de algoritmos

Individuo	Tonalidad de piel	Algoritmo 4	Algoritmo 7	% Replicación
1	Tipo II	10/10	10/10	100 %
2	Tipo IV	10/10	10/10	100 %
3	Tipo III	10/10	10/10	100 %
4	Tipo II	10/10	10/10	100 %
5	Tipo IV	10/10	10/10	100 %
6	Tipo III	10/10	10/10	100 %
7	Tipo I	9/10	10/10	95 %
8	Tipo III	10/10	10/10	100 %
9	Tipo V	8/10	10/10	90 %
10	Tipo I	10/10	9/10	95 %

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos por el discriminante de la tonalidad de piel.

Los resultados de las pruebas de funcionamiento acorde a la variación del tono de la piel indican que el sistema funciona entre las tonalidades de piel Tipo II a la IV, en el porcentaje del Tipo I se presenta un nivel de replicación del 95 %, por lo que no existe una falla significativa, por otro lado el Tipo V una piel más oscura representa un porcentaje de efectividad del 90 %, por lo que las pruebas arrojan resultados en los cuales los extremos de las tonalidades de la piel tienen un porcentaje mínimo de error.

Prueba de variación de luces

Se realizaron pruebas en distintos ambientes con iluminación externa, baja iluminación y un rango medio.

Tabla 4-5.:
Resultados de la variación de iluminación

Individuo	Iluminación (lux)	Algoritmo 10	Algoritmo 11	% Replicación
1	198	10/10	9/10	95 %
	9	10/10	10/10	100 %
	0.17	2/10	1/10	15 %
2	125	10/10	10/10	100 %
	7.2	10/10	10/10	100 %
	0.17	2/10	1/10	15 %
3	103	10/10	10/10	100 %
	7.67	10/10	10/10	100 %
	0.18	2/10	2/10	20 %
4	103.4	10/10	9/10	95 %
	7.19	10/10	10/10	100 %
	0.21	1/10	0/10	0.05 %
5	185	10/10	10/10	100 %
	10.2	8/10	10/10	90 %
	0.5	0/10	1/10	0.05 %
6	105.2	10/10	10/10	100 %
	9.5	10/10	10/10	100 %
	0.32	1/10	1/10	10 %
7	156.3	9/10	10/10	95 %
	11.2	10/10	10/10	100 %
	0.17	3/10	1/10	20 %
8	109.2	10/10	10/10	100 %
	9.8	10/10	10/10	100 %
	0.26	0/10	0/10	0 %
9	118.4	10/10	10/10	100 %
	12	10/10	10/10	100 %
	0.19	0/10	0/10	0 %
10	127	9/10	10/10	95 %
	8.7	10/10	10/10	100 %
	0.34	1/10	1/10	10 %

Nota. La tabla muestra los resultados obtenidos por la variación de lúxeles.

Las pruebas realizadas arrojan resultados en los que el nivel de funcionamiento de la mano se encuentra establecido de manera óptima en un rango medio de iluminación que se encuentra entre los 7 a 12 lux, por otro lado también se establece una capacidad significativa que varía

entre el 95 al 100 % con la iluminación externa en rangos que superan 100 lux, mientras que la falta de iluminación en un rango de menos de 1 lux tienen fallas significativas con niveles porcentuales máximos de 20 % de replicación del sistema.

4.0.5. Resultados de las pruebas

Resultados de las pruebas de variación de iluminación

En cuanto a los resultados obtenidos la variación de los lúxeles permite la determinación de la cantidad de movimientos controlados por los usuarios. El rango de variación de los lúxeles se encuentra en tres niveles.

- Nivel 1: Medición de la capacidad del sistema con la introducción de un haz de luz a la captura de la imagen.
- Nivel 2: Se realizó la medición en una iluminación ambiente de tango medio.
- Nivel 3: Pruebas de funcionamiento en ausencia de luz, oscuridad rango menor a 1 lux.

La variación de la cantidad de luz de acuerdo a los niveles arroja diferentes resultados de acuerdo a el rango en el que se encuentra la medición, la captura de vídeo óptima se encuentra en un rango medio nivel dos, entre los 6 a 14 lúxeles, por lo tanto se estima que la iluminación media y alta son mejores para la captura de la imagen.

El nivel tres se encuentra determinada por la falta de iluminación menor a 1 lux, en este caso la captura de la imagen fue casi inexistente, por lo que la eficacia del sistema resultó ineficiente, debido a que el porcentaje de replicación de movimientos en este ambiente se encuentra en un nivel menor al 20 %.

Resultados de las pruebas de variación de tonalidades de la piel

La segunda prueba realizada se basó en las tonalidades de la piel, se encuentran delimitadas por seis categorías, entre las más claras se encuentran las tipo I, y más oscuras tonalidades tipo V y VI, la tonalidad de la mano en relación a la toma de las pruebas tiene gran influencia, debido a que se observó un nivel superior de replicación de movimientos dactilares en la prótesis de mano. Las tonalidades de piel más claras aquellas tipo I pierden por defecto un nivel mínimo de control es decir una falla del 5 %, por lo que no es un rango porcentual alto, por otro lado las tonalidades intermedias Tipo II, III y IV se encuentran en un rango óptimo, logrando un porcentaje de control del algoritmo cuatro y siete del 100 %, es decir

una efectividad máxima.

la capacidad de la cámara de detectar en el nivel de piel Tipo V arrojan resultados del 90 % de control, en la detección de las manos con tonalidades más oscuras se percibe una disminución del 10 %.

De acuerdo al porcentaje establecido se percibe que el sistema permite un control preciso entre las tonalidades de piel media, además de una replicación de movimientos dactilares del 95 % en pieles claras, y un rango de error del 10 % en tonalidades más oscuras.

Resultados de las pruebas de variación de dimensiones

La influencia de las dimensiones recibidas se encuentra influenciada de acuerdo a el tamaño de las mismas en base a los resultados es posible indicar que las manos más grandes toman un papel más importante en el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano, debido a que existe un funcionamiento del sistema con una falla mínima del 5 %, lo cual es una cantidad porcentual baja.

Las pruebas en manos de tamaño promedio arrojan resultados en donde el porcentaje de replicación es del 100 %, es decir se encuentran en un rango óptimo de funcionamiento, en cuanto a las manos pequeñas las pruebas generaron un porcentaje de error de 90 % en 14.5cm y del 85 % en 14 cm, los resultados establecen un nivel de error máximo de 15 %.

En base a la descripción de los resultados obtenidos sobre las pruebas de funcionamiento podemos establecer que el patrón de control eficaz del sistema se encuentra entre los rangos medios del tamaño de la mano, excluyente en menores de 14.5 cm y mayores de 22cm.

4.0.6. Discusión

En base a las pruebas realizadas podemos indicar que el funcionamiento de la prótesis de manos y su control mediante la visión artificial del movimiento de los dedos se establece bajo especificaciones detalladas a continuación.

- El control tiene un funcionamiento óptimo del 100 % entre las tonalidades de la piel referentes al tipo dos, tres, cuatro, con fallas de 5 % en lastonalidades del tipo uno, mientras que una falla del 10 % en el tipo V, es decir, que el funcionamiento del control de los movimientos de los dedos de una prótesis de mano tienen una influencia mínima en las tonalidades de la piel de los extremos del rango.

- El rango de movimiento de los dedos se delimita acorde a la variación de las dimensiones, en cuanto a los resultados encontramos que los movimientos controlados por una mano de tamaño grande fueron funcionales; sin embargo presentan un índice de error del 5%, las dimensiones medias tienen un nivel de control del 100%, y las pequeñas entre el 85% a el 90%, por lo cual podemos deducir que el rango de control del movimiento de las manos se encuentra entre los 18.8 cm a los 19 cm al 100% de acuerdo a las muestras realizadas.
- En la tabla determinada por la variación de los luxes, podemos encontrar que en rangos medios el funcionamiento de la prótesis es óptimo, además de establecer que a rangos muy elevados de luz la cantidad de movimientos realizados no varía entre participantes con una gamma media de iluminación; sin embargo la recepción de movimientos con una iluminación baja es muy poco eficiente, por lo tanto el rango de luz apropiado se encuentra entre los 6 a 200 lúmenes.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El proyecto planteado se ha logrado en base al establecimiento de métodos de control de los movimientos de los dedos de una prótesis de mano, guiada mediante algoritmos de visión artificial por medio de la programación en python con ayuda específica de las librerías Open cv y MediaPipe, además de el establecimiento de la comunicación serial entre el dispositivo protésico y la cámara que permite el control.

La identificación de la aplicación de la visión artificial para el control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano se logró mediante la búsqueda del estado del arte, en donde los antecedentes de control de una prótesis de mano arrojan resultados relacionados principalmente con los dispositivos realizados mediante electromiograma, por lo que la visión artificial resulta en un modelo de control innovador que podría resultar en un método eficiente en estudios posteriores.

El desarrollo de los algoritmos de visión artificial se logró mediante la programación en lenguajes de python y en C en Arduino, mediante la configuración de 11 movimientos dactilares, es importante indicar que las configuraciones de patrones de movimiento se realizaron mediante servomotores la captura de imagen mediante una cámara.

La evaluación del sistema y desarrollo de las pruebas de funcionamiento se concluyen en base a tres discriminantes importantes, la variación de la cantidad de luz para el sistema, la tonalidad de la piel, y el cambio de las dimensiones de las manos, dentro de las pruebas se logró concluir que el sistema funciona en óptimas condiciones entre rangos de cantidad de luz media y alta, además del tono de la piel entre rangos medios, además de las dimensiones de las manos que se establecen en un rango de 18.8 cm a 19 cm para el funcionamiento sin fallas del sistema.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda establecer el control mediante un sistema de comunicación inalámbrico con el fin de permitir un control del movimiento de los dedos para una prótesis de mano a larga

distancia.

Realizar pruebas con un mayor número de discriminantes y usuarios, para establecer un rango de funcionamiento más detallado, además de probar con un sistema de captura de imágenes con mayor capacidad.

Establecer una mayor cantidad de números de movimientos, con la finalidad de lograr un control más preciso y que permita el funcionamiento de la prótesis a una mayor escala.

Realizar estudios combinando técnicas de control como la combinación entre electromiografía y visión artificial, con la finalidad de determinar el nivel de trabajo entre ambos métodos con la finalidad de establecer un control más preciso.

A. Anexo A: Código principal

```
1 import cv2
2 from detector.main import GestureDetector
3 from interface.serial_communication import SerialCommunication
4 import time
5
6 class ManoControl:
7     def __init__(self):
8         self.cap = cv2.VideoCapture(0)
9         self.cap.set(3, 720)
10        self.cap.set(4, 720)
11        self.hand_gesture = GestureDetector()
12        self.communication = SerialCommunication()
13
14    def frame_processing(self):
15        try:
16            while True:
17                t = cv2.waitKey(5)
18                ret, frame = self.cap.read()
19                if not ret:
20                    print("Failed to capture frame")
21                    break
22
23                command, draw_frame = self.hand_gesture.
gesture_interpretation(frame)
24                self.communication.sending_data(command)
25                cv2.imshow('Car gesture control', draw_frame)
26
27                if t == 27: # ESC key to exit
28                    break
29                time.sleep(0.1)
30        except Exception as e:
31            print(f"An error occurred: {e}")
32        finally:
33            self.cap.release()
34            cv2.destroyAllWindows()
35
36 detector = ManoControl()
37 detector.frame_processing()
```

B. Anexo B: Código

```
1 import numpy as np
2 from typing import List, Tuple
3 from detector.hand_gesture_extractor import HandProcessing
4 from detector.dibujo_funciones import DrawingFunctions
5
6 class GestureDetector:
7     def __init__(self):
8         self.hand_detector = HandProcessing(threshold_detection=0.9)
9         self.draw = DrawingFunctions()
10
11     def fingers_interpretation(self, fingers_up: List[int]) -> str:
12         commands = {
13             (1, 0, 0, 0, 0): 'A',
14             (0, 1, 0, 0, 0): 'E',
15             (0, 0, 1, 0, 0): 'I',
16             (0, 0, 0, 1, 0): 'O',
17             (0, 0, 0, 0, 1): 'U',
18             (1, 1, 0, 0, 0): 'B',
19             (0, 1, 1, 0, 0): 'C',
20             (0, 1, 1, 1, 0): 'D',
21             (1, 1, 1, 1, 1): 'F',
22             (0, 0, 0, 0, 0): 'G',
23             (1, 1, 1, 0, 0): 'H',
24         }
25         return commands.get(tuple(fingers_up), "")
26
27     def gesture_interpretation(self, img: np.ndarray) -> Tuple[str, np.
28 ndarray]:
29         frame = img.copy()
30         frame = self.hand_detector.find_hands(frame, draw=True)
31         hand_list, bbox = self.hand_detector.find_position(frame, draw_box
32 =False)
33         if len(hand_list) == 21:
34             fingers_up = self.hand_detector.fingers_up(hand_list)
35             command = self.fingers_interpretation(fingers_up)
36             frame = self.draw.draw_actions(command, frame)
37             return command, frame
38         else:
39             return "P", frame
```

C. Anexo C: Código extracción de gestos

```
1 import math
2 import cv2
3 import numpy as np
4 import mediapipe as mp
5 from typing import List, Tuple
6 import time
7
8 class HandProcessing:
9     time.sleep(0.1)
10    def __init__(self, mode=False, hands=1, model_complexity=0,
11                threshold_detection=0.5, threshold_tracking=0.5):
12
13        self.mode = mode
14        self.max_hands = hands
15        self.complexity = model_complexity
16        self.conf_deteccion = threshold_detection
17        self.conf_tracking = threshold_tracking
18
19        self.mp_hands = mp.solutions.hands
20        self.hands = self.mp_hands.Hands(self.mode, self.max_hands, self.
21        complexity, self.conf_deteccion, self.conf_tracking)
22        self.draw = mp.solutions.drawing_utils
23        self.tip = [4, 8, 12, 16, 20]
24
25    def find_hands(self, frame: np.ndarray, draw: bool = True) -> np.
26    ndarray:
27        img_color = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2RGB)
28        self.results = self.hands.process(img_color)
29
30        if self.results.multi_hand_landmarks:
31            for mano in self.results.multi_hand_landmarks:
32                if draw:
33                    self.draw.draw_landmarks(frame, mano, self.mp_hands.
34                    HAND_CONNECTIONS)
35            return frame
36
37    def find_position(self, frame: np.ndarray, hand: int = 0, draw_points:
38    bool = True, draw_box: bool = True, color: List[int] = []) \
39        -> Tuple[List[List[int]], Tuple[int, int, int, int]]:
40        xlist: List[int] = []
```

```

36     ylist: List[int] = []
37     bbox: Tuple[int, int, int, int] = ()
38     hands_list: List[List[int]] = []
39
40     if self.results.multi_hand_landmarks:
41         my_hand = self.results.multi_hand_landmarks[hand]
42         for id, lm in enumerate(my_hand.landmark):
43             alto, ancho, c = frame.shape
44             cx, cy = int(lm.x * ancho), int(lm.y * alto)
45             xlist.append(cx)
46             ylist.append(cy)
47             hands_list.append([id, cx, cy])
48             if draw_points:
49                 cv2.circle(frame, (cx, cy), 3, (0, 0, 0), cv2.FILLED)
50
51             xmin, xmax = min(xlist), max(xlist)
52             ymin, ymax = min(ylist), max(ylist)
53             bbox = xmin, ymin, xmax, ymax
54             if draw_box:
55                 cv2.rectangle(frame, (xmin - 20, ymin - 20), (xmax + 20,
yamax + 20), color, 2)
56         return hands_list, bbox
57
58     def fingers_up(self, keypoints_list: List[List[int]]) -> List[int]:
59         fingers: List[int] = []
60         if keypoints_list[self.tip[0]][1] > keypoints_list[self.tip[0] -
1][1]:
61             fingers.append(1)
62         else:
63             fingers.append(0)
64
65         for i in range(len(self.tip)):
66             if i == 0:
67                 continue
68             if keypoints_list[self.tip[i]][2] < keypoints_list[self.tip[i]
- 2][2]:
69                 fingers.append(1)
70             else:
71                 fingers.append(0)
72
73         return fingers
74
75     def distance(self, p1: int, p2: int, frame: np.ndarray, draw: bool =
True, radio: int = 15, thickness: int = 3) -> \
76         Tuple[float, np.ndarray, list]:
77         x1, y1 = self.list[p1][1:]
78         x2, y2 = self.list[p2][1:]
79         cx, cy = (x1 + x2) // 2, (y1 + y2) // 2

```

```
80     if draw:
81         cv2.line(frame, (x1, y1), (x2, y2), (0, 0, 255), thickness)
82         cv2.circle(frame, (x1, y1), radio, (0, 0, 255), cv2.FILLED)
83         cv2.circle(frame, (x2, y2), radio, (0, 0, 255), cv2.FILLED)
84         cv2.circle(frame, (cx, cy), radio, (0, 0, 255), cv2.FILLED)
85     length = math.hypot(x2 - x1, y2 - y1)
86
87     return length, frame, [x1, y1, x2, y2, cx, cy]
```

D. Anexo D: Código Dibujo funciones

```
1 import cv2
2 import numpy as np
3 import os
4
5 class DrawingFunctions:
6     def __init__(self):
7         base_path = r'C:\Users\Usuario\Desktop\control - copia\control\
control\detector'
8         self.img_cerrar = cv2.imread(os.path.join(base_path, 'enviando.jpg
'))
9
10        print(f"Ruta de 'enviando.jpg': {os.path.join(base_path, 'enviando
.jpg')}")
11
12        def draw_image(self, original_frame: np.ndarray, action_image: np.
ndarray):
13            al, an, c = action_image.shape
14            original_frame[600:600 + al, 50:50 + an] = action_image
15            return original_frame
16
17        def draw_actions(self, action: str, original_frame: np.ndarray) -> np.
ndarray:
18            actions_dict = {
19                'CERRAR': self.img_cerrar,
20                # Agrega para todas las im genes...
21            }
22            if action in actions_dict:
23                movement_image = actions_dict[action]
24                if movement_image is not None:
25                    original_frame = self.draw_image(original_frame,
movement_image)
26            return original_frame
27
28 # Ejemplo de uso para depurar
29 if __name__ == "__main__":
30
31     drawing_functions = DrawingFunctions()
32
33     action = 'CERRAR'
34     original_frame = np.zeros((1000, 1000, 3), dtype=np.uint8) # Ejemplo
```

```
de marco original
35     result_frame = drawing_functions.draw_actions(action, original_frame)
36
37
38     cv2.imshow('Resultado', result_frame)
39     cv2.waitKey(0)
40     cv2.destroyAllWindows()
```

E. Anexo E: Código comunicación

```
1 import serial
2 import time
3
4 class SerialCommunication:
5     def __init__(self, port='COM7', baudrate=9600, timeout=2):
6         try:
7             self.ser = serial.Serial(port, baudrate)
8             time.sleep(timeout)
9         except serial.SerialException as e:
10            print(f"Error en el puerto serial: {e}")
```

F. Anexo F: Código

```
1 def sending_data(self, command: str) -> None:
2     try:
3         command = command.upper()
4         if command == 'A':
5             self.ser.write(b'1')
6
7         elif command == 'E':
8             self.ser.write(b'2')
9
10        elif command == 'I':
11            self.ser.write(b'3')
12
13        elif command == 'O':
14            self.ser.write(b'4')
15
16        elif command == 'U':
17            self.ser.write(b'5')
18
19        elif command == 'B':
20            self.ser.write(b'6')
21
22        elif command == 'C':
23            self.ser.write(b'7')
24        elif command == 'D':
25            self.ser.write(b'8')
26
27        elif command == 'F':
28            self.ser.write(b'9')
29
30        elif command == 'G':
31            self.ser.write(b'10')
32
33        elif command == 'H':
34            self.ser.write(b'11')
35
36        else:
37            print("Comando no reconocido")
38            self.ser.write(b'0')
39    except serial.SerialException as e:
40
```

```
41     def close(self):
42         if self.ser.is_open:
43             self.ser.close()
44
45
46 if __name__ == "__main__":
47     communication = SerialCommunication()
48     try:
49         while True:
50             vocal = input()
51             communication.sending_data(vocal)
52     except KeyboardInterrupt:
53
54     finally:
55         communication.close()
```

G. Anexo G: Código comunicación Arduino

```
1 #include <Servo.h>
2
3 Servo pulgar;
4 Servo medio;
5 Servo anular;
6 Servo menique;
7 Servo indice;
8
9 void setup() {
10     Serial.begin(9600);
11     pulgar.attach(6);
12     pulgar.write(20);
13     indice.attach(5);
14     indice.write(90);
15     medio.attach(4);
16     medio.write(30);
17     anular.attach(3);
18     anular.write(30);
19     menique.attach(2);
20     menique.write(30);
21
22 }
23
24 void loop() {
25     if (Serial.available() > 0) {
26         char command = Serial.read();
27
28         switch (command) {
29             case '1':
30                 pulgar.write(20);
31
32                 break;
33             case '2':
34                 indice.write(20);
35
36                 break;
37             case '3':
```

```
38     medio.write(170);
39
40     break;
41     case '4':
42         anular.write(180);
43
44         break;
45     case '5':
46         menique.write(150);
47
48         break;
49     case '6':
50         pulgar.write(20);
51         indice.write(20);
52
53         break;
54     case '7':
55         indice.write(20);
56         medio.write(170);
57
58         break;
59     case '8':
60         indice.write(20);
61         medio.write(170);
62         anular.write(180);
63
64         break;
65     case '9':
66         pulgar.write(20);
67         indice.write(20);
68         medio.write(170);
69         anular.write(180);
70         menique.write(150);
71
72         break;
73     case '10':
74         medio.write(10);
75         anular.write(10);
76         menique.write(10);
77         indice.write(170);
78         pulgar.write(150);
79
80         break;
81     case '11':
82         pulgar.write(20);
83         indice.write(20);
84         medio.write(170);
85
```

```
86     break;
87     default:
88         medio.write(10);
89         anular.write(10);
90         menique.write(10);
91         indice.write(170);
92         pulgar.write(150);
93
94     break;
95 }
96 }
97 }
```


H. Anexo H: Consentimiento informado

Figura H-1.:
Consentimiento informado

CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA EL ESTUDIO:

Título del Proyecto: Control del movimiento de los dedos de una prótesis de mano mediante visión artificial
Investigador Principal: Camila Gualeha Moreno

Yo, _____

Declaro que:

- He podido formular las preguntas que he considerado necesarias acerca del estudio.
- He recibido información adecuada y suficiente por el investigador abajo indicado sobre:
 - Los objetivos del estudio y sus procedimientos.
 - Los beneficios e inconvenientes del proceso.
 - Que mi participación es voluntaria y altruista
 - El procedimiento y la finalidad con que se utilizarán mis datos personales.
 - Que en cualquier momento puedo revocar mi consentimiento (sin necesidad de explicar el motivo y sin que ello afecte a mi atención médica) y solicitar la eliminación de mis datos personales.
 - Que tengo derecho de acceso y rectificación a mis datos personales.

CONSIENTO EN LA PARTICIPACIÓN EN EL PRESENTE ESTUDIO

SI NO

Para dejar constancia de todo ello, firmo a continuación:

Fecha

Firma

Nota. Imagen del consentimiento informado. Autoría propia.

Bibliografía

- Alturkistani, R., A, K., Devasahayam, S., et al. (2020). Affordable passive 3D-printed prosthesis for persons with partial hand amputation. *Prosthetics and Orthotics International*, 44(2), 92-98. <https://doi.org/10.1177/0309364620905220>
- Ángel-López, J. P., & Arzola de la Peña, N. (2017). Voice Controlled Prosthetic Hand with Predefined Grasps and Movements. En I. Torres, J. Bustamante & D. A. Sierra (Eds.), *VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2016, Bucaramanga, Santander, Colombia, October 26th -28th, 2016* (pp. 520-523). Springer Singapore.
- Bazira, P. J. (2022). Surgical anatomy of the hand. *Surgery (Oxford)*, 40(3), 155-162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2022.01.001>
- Choi, S., Cho, W., & Kim, K. (2023). Restoring natural upper limb movement through a wrist prosthetic module for partial hand amputees. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01259-9>
- de Oliveira de Souza, J. O., dos Santos, J. V. C., de Figueiredo, R. M., & Pessin, G. (2018). Real-Time Hand Prosthesis Biomimetic Movement Based on Electromyography Sensory Signals Treatment and Sensors Fusion. En V. Kůrková, Y. Manolopoulos, B. Hammer, L. Iliadis & I. Maglogiannis (Eds.), *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2018* (pp. 147-156). Springer International Publishing.
- Dellon, A. L., & Dellon, A. L. (2019). Radial wrist denervation. *Joint Denervation: An Atlas of Surgical Techniques*, 45-60.
- Geovanny, R. M. L. (2019). *Desarrollo e implementación de un sistema de visión artificial y seguimiento de objetivos humanos por un cuadricóptero de exteriores utilizando Matlab* [Tesis de maestría].
- Kumar, M., Krishnanand, Varshney, A., & Taufik, M. (2023). Hand prosthetics fabrication using additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.396>
- Lei, Y., Li, J., Li, Z., et al. (2024). Aprendizaje rápido en visión por computadora: una encuesta. *Frente Informar Technol Electron Eng*, 25, 42-63. <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1631/FITEE.2300389>
- Ozenen, G. (2024). Lighting Fundamentals and Design Principles. En *Architectural Interior Lighting* (pp. 15-24). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49695-0_3

- Pillemer, R. (2022). Anatomy and Function of the Hand. En *Handbook of Upper Extremity Examination: A Practical Guide* (pp. 11-55). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86095-0_2
- Prakash, A., Sharma, N., Katiyar, A. K., Dubey, S. K., & Sharma, S. (2022). Magnetic-based detection of muscular contraction for controlling hand prosthesis. *Sensors and Actuators A: Physical*, *344*, 113709. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113709>
- Promotec. (s.f.). Servomotor MG995 [Accessed: 2024-07-09].
- Qi, J., Ma, L., Cui, Z., et al. (2024a). Computer vision-based hand gesture recognition for human-robot interaction: a review. *Complex Intelligent Systems*, *10*, 1581-1606. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01173-6>
- Qi, J., Ma, L., Cui, Z., et al. (2024b). Reconocimiento de gestos de la mano basado en visión artificial para la interacción entre humanos y robots: una revisión. *Complex Intelligent Systems*, *10*, 1581-1606. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01173-6>
- Sánchez-Brizuela, G., Ciscal, A., de la Fuente-López, E., et al. (2023). Segmentación ligera de manos en tiempo real aprovechando la detección de puntos de referencia de MediaPipe. *Realidad Virtual*, *27*, 3125-3132. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00858-0>
- Shaik, R., & R, R. S. (2024). OIPFST: AI-based Fitzpatrick skin tone labelling utilizing skin lesions. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19324-3>
- Stewart, C. M., & Ghareeb, P. A. (2023). Hand Anatomy. En J. G. Lane, A. Gobbi, J. Espregueira-Mendes, C. C. Kaleka & N. Adachi (Eds.), *The Art of the Musculoskeletal Physical Exam* (pp. 211-231). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24404-9_23
- Yatsun, S., Malchikov, A., & Rukavitsyn, A. (2024). Desarrollo de un sistema de control de prótesis de mano con retroalimentación táctil. *Biomed Eng* *58*, 10-13. <https://doi.org/https://bibliotecas.ups.edu.ec:2582/10.1007/s10527-024-10356-5>
- Yegin, V., & Onat, M. (2022). Developing finger joint biomechanics through a dynamic hand model. *Emerging Materials Research*, *11*(2), 198-208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jemmr.21.00182>