

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REALIZACIÓN DE FUNCIONES
BÁSICAS DE LA MANO HUMANA EN PRÓTESIS DE BAJO COSTO PARA
MIEMBRO SUPERIOR.

NEFER JESUS BLANCHAR GARCIA

(INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INGENIERÍA SISTEMAS)

JUAN CAMILO GOMEZ BETANCOURT

(INGENIERÍA ELECTRÓNICA)



DEPARTAMENTO DE
CIENCIAS
DE LA COMPUTACIÓN
Y ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC

PREGRADO EN INGENIERIA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2020

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REALIZACIÓN DE FUNCIONES
BÁSICAS DE LA MANO HUMANA EN PRÓTESIS DE BAJO COSTO PARA
MIEMBRO SUPERIOR.

NEFER JESUS BLANCHAR GARCIA
JUAN CAMILO GOMEZ BETANCOURT

Trabajo de grado para obtener el título de Pregrado en Ingeniería electrónica y de
Sistemas

TUTOR: MSc. JOSÉ GREGORIO CAICEDO ORTIZ

COTUTOR: PhD. JAVIER AUGUSTO JIMENEZ CABAS

UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y
ELECTRÓNICA

PREGRADO EN INGENIERÍA
BARRANQUILLA, COLOMBIA

2020

Nota de aceptación:

Firma de jurado

Firma de jurado

Barranquilla, 14 de septiembre 2020

Resumen

En el mundo, según la OMS, se estima que más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad; sólo en Colombia, según el censo realizado por el DANE en el 2005, se identificó que el 6.3% de la población presenta algún tipo de discapacidad, entre ellas la amputación de miembro superior, el cual puede ser reemplazado por una prótesis para mejorar la calidad de vida de estas personas; por ello, la empresa 3D Ingeniería BQ con asesoría de la fundación CE CAMILO (Guadalupe Avelar) decidió crear un prototipo de prótesis mioeléctrica de miembro superior, a bajo costo; adicionando a su equipo de trabajo un grupo de estudiantes de Ingeniería Electrónica y de Sistemas de la Universidad de la Costa, para que éstos se encargaran de mejorar la funcionalidad del prototipo. La idea original de la empresa era crear una prótesis mioeléctrica que contara con dos sensores ubicados en músculos del miembro amputado que enviaran señales a un controlador, uno para realizar el cambio de funciones y otro para realizar la función en sí misma; para lo cual se analizaron diferentes tecnologías como: plataformas de sistemas embebidos como las tarjetas de Arduino (uno, mega, nano, leo etc.), las tarjetas Raspberry Pi (P4 Model B, PI3 Model B+, PI3 Model A+. etc), las tarjetas Beagleboard (Black, Blue, AI), sensores (V3, Myoware), actuadores (PQ12-R, MG996, L16-R) y protocolo de comunicación (Bluetooth), con el objetivo de identificar el ideal para realizar el circuito que le brindaría el movimiento y las múltiples funciones al prototipo. Así mismo, analizar y evaluar la factibilidad de los requerimientos de la empresa en cuanto a las funciones que deseaba adicionar y/o perfeccionar haciéndole propuestas; dentro de ellas, la propuesta de modificar el actual cambio de posiciones que funcionaba con base a un sensor, por una alternativa más amigable e interactiva con el usuario, como es una aplicación para smartphone utilizando el módulo bluetooth como protocolo de comunicación entre la aplicación y la prótesis. Realizada la

aplicación para smartphone en la plataforma Xamarín y la programación de la tarjeta Arduino, plasmando en ella los requerimientos y propuestas definidas previamente por la empresa 3D Ingeniería BQ y el equipo de ingenieros encargados del desarrollo del proyecto, se procede al montaje del prototipo para realizar las pruebas de funcionalidad con miembros del grupo de trabajo, con el objetivo de analizar y corregir cualquier anomalía en su funcionamiento, para posteriormente realizar las pruebas con el usuario final.

Palabras clave: Prótesis, Prótesis Mioeléctrica, Miembro superior, Impresión 3D, Bajo costo

Abstract

According to WHO in the whole world Over a billion people are estimated to live with some form of disability. Only in Colombia according to the census carried out in 2005 by DANE showed about 6.3% of the population has some type of disability, including amputation of upper limbs. Which can be replaced by a prosthesis to improve the quality of life of these people. For that reason, the company 3D Ingenieria BQ with the advice of the foundation CE CAMILO (Guadalupe Avelar) decided to create a low-cost upper limb myoelectric prosthesis prototype, adding to their work team a group of electronic and systems engineering students from the Universidad de la costa, in order to let them in charge to refine the movement of the prototype. The original idea of the company was to create a myoelectric prosthesis that had two sensors located in the muscles of the amputated limb that will send signals to a controller, one to perform the change of functions and the other to perform the function itself. For this, different technologies were analysed such as: embedded hardware platforms like Arduino boards (one, mega, leo, nano, etc), Raspberry pi boards(P4 Model B, PI3 Model B+, PI3 Model A+, etc), Beagleboards (Black, Blue, AI), sensors (V3,Myoware), actuators (PQ12-R, MG996, L16-R), and communication protocols (Bluetooth), with the aim of identifying the ideal to make the circuit that would provide the movement and multiple functions to the prototype. likewise, analyse and evaluate the feasibility of the company's requirements in terms of the functions that they wanted to add and improve by making proposals; including the proposal to modify the current change of positions that worked based on a sensor, with an easier and interactive alternative with the user, such as a smartphone application using the Bluetooth module as a communication protocol between the application and the prosthesis. Once the smartphone application made in the Xamarin platform is finished and the Arduino board is programmed,

reflecting in it the requirements and proposals previously defined by the company 3D Ingeniería BQ and the team of engineers in charge of the project development, the prototype was assembled to perform functionality tests with members of the work group, in order to analyse and correct any anomaly in its operation, to later carry out the end-user testing.

Keywords: prothesis, myoelectric prothesis, upper limb, 3D print, low cost

Contenido

Lista de Tablas y Figuras	12
Introducción	16
Planteamiento del problema.....	19
Justificación	20
Objetivos	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos	21
Marco conceptual.....	22
Fundamentos relacionados con la anatomía y deficiencias de miembro superior que conllevan discapacidad	23
Anatomía de la mano	23
Músculos.....	24
Electromiografía	25
Discapacidad en miembro superior	27
Estadística discapacidad en Colombia.....	29
Tipos de prótesis en el mercado.....	33
Revisión de la literatura.....	33
Prótesis pasiva	39
Prótesis mecánica	40
Prótesis eléctrica	41

Prótesis mioeléctrica.....	41
Prótesis híbridas.....	42
Principales tecnologías utilizadas en el desarrollo de prótesis electrónicas	43
Microcontroladores arduino	43
Arduino Uno Rev3.....	44
Arduino Mega.....	45
Arduino Nano.....	47
Raspberry Pi	50
Raspberry Pi 4 Model B.....	51
<i>Raspberry</i> Pi 3 Model B+.....	53
Raspberry Pi 3 Model A+.....	54
Beagleboard.....	55
BeagleBone Black.....	56
BeagleBone Blue.....	57
BeagleBone AI.....	59
Software.....	60
Xamarin.....	60
Arduino IDE.....	62
Sensores.....	62
Mioeléctricos muscle sensor V3.....	62

PRÓTESIS PARA MIEMBRO SUPERIOR A BAJO COSTO	10
Mioeléctricos myoware muscle sensor AT-04-001.	63
Actuadores	65
PQ12-R micro linear servo.	65
Servomotor MG996.	66
Servo lineal L16-R.....	67
Protocolo bluetooth.....	68
Módulo HC – 05.	71
Módulo HC – 06.	72
Módulo HC – 08.	73
Impresión 3D	75
Metodología	76
Evaluación funcionamiento inicial prótesis	77
Identificación y priorización alternativas de mejora.....	78
Alternativas electrónicas.....	81
Cambio de funciones.....	81
Electrodos de tela conductora.	81
Alternativas de diseño	82
Oposición del pulgar	82
Mejoras para implementar en la prótesis	83
Implementación de las alternativas de mejora identificadas.....	83
Arduino	84

PRÓTESIS PARA MIEMBRO SUPERIOR A BAJO COSTO	11
Bluetooth	87
Aplicación móvil	89
Evaluación final del sistema electrónico.....	90
Conexiones	91
Funciones implementadas.....	93
Prueba de usuario.....	94
Conclusiones	97
Referencia	99

Lista de Tablas y Figuras**Tablas**

Tabla 1. Especificaciones Arduino UNO.....	45
Tabla 2. Especificaciones Arduino Mega	46
Tabla 3. Especificaciones Arduino Nano.....	48
Tabla 4. Comparación entre Arduino UNO, MEGA2560 y NANO.....	49
Tabla 5. Especificaciones Raspberry Pi 4 Model B.....	52
Tabla 6. Especificaciones Raspberry Pi 3 Model B+	54
Tabla 7. Especificaciones Raspberry Pi 3 Model A+	55
Tabla 8. Especificaciones BeagleBone Black.....	56
Tabla 9. Especificaciones BeagleBone Blue	58
Tabla 10. Especificaciones BeagleBone AI.....	60
Tabla 11. Especificaciones muscle sensor V3	63
Tabla 12. Especificaciones Myoware muscle sensor.....	64
Tabla 13. Comparación de sensores muscle sensor V3 y Myoware muscle sensor	65
Tabla 14. Especificaciones PQ12-R Micro Servo Lineal 100:1, Servo lineales L16-R 63:1, Servomotor MG996	67
Tabla 15. Diferencias entre versiones Bluetooth	70
Tabla 16. Materiales.....	77
Tabla 17. Conexiones Bluetooth.....	87

Figuras

Figura 1. Ingenieros Roberto Algarín R., Luis López T. y Javier Vargas D. (respectivamente) fundadores de 3D Ingeniería BQ	16
Figura 2. Prótesis 3D Ingeniería BQ.....	18
Figura 3. Estructura ósea de la mano	23
Figura 4. Falanges y articulaciones del dedo índice	24
Figura 5. Composición muscular	25
Figura 6. Electromiografía	26
Figura 7. Tratamiento de señales EMG	27
Figura 8. Grafica de personas con discapacidad en Colombia	30
Figura 9. Grafica de personas con discapacidad en el Atlántico	31
Figura 10. Prótesis Universidad del Cauca.....	34
Figura 11. Prótesis Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.	35
Figura 12. Prótesis Escuela de Comunicaciones y Artes de la Universidad de São Paulo...36	
Figura 13. Prótesis Michelangelo	37
Figura 14. Prótesis bebionic.....	38
Figura 15. Prótesis i-Limb Ultra	39
Figura 16. Prótesis estética	39
Figura 17. Prótesis Mecánica.....	40
Figura 18. Prótesis Eléctrica	41
Figura 19. Prótesis mioeléctrica.....	42
Figura 20. Prótesis Híbrida	43
Figura 21. Arquitectura general de una aplicación Xamarin multiplataforma	61

Figura 22. IDE Arduino	62
Figura 23. Arduino Uno Rev3	44
Figura 24. Arduino Mega.....	45
Figura 25. Arduino Nano	47
Figura 26. Raspberry Pi	50
Figura 27. Raspberry Pi 4 Model B	51
Figura 28. Raspberry Pi 3 Model B+	53
Figura 29. Raspberry Pi 3 Model A+.....	54
Figura 30. BeagleBone Black	56
Figura 31. BeagleBone Blue	57
Figura 32. BeagleBone AI	59
Figura 33. Muscle sensor v3	63
Figura 34. Myoware muscle sensor	63
Figura 35. Servo motor	65
Figura 36. Servomotor MG996.....	66
Figura 37. Servo lineales L16-R	67
Figura 38. Envíos de dispositivos Bluetooth anuales expresado en miles de millones	69
Figura 39. Línea de tiempo de las versiones de Bluetooth	70
Figura 40. Módulo HC – 05.....	71
Figura 41. Módulo HC – 06.....	72
Figura 42. Módulo HC - 08.....	73
Figura 43. Impresión 3D.....	75
Figura 44. Circuito empresa 3D Ingeniería BQ	78

PRÓTESIS PARA MIEMBRO SUPERIOR A BAJO COSTO	15
Figura 45. Típeo.....	79
Figura 46. Agarre Fino.....	80
Figura 47. Electrodo de tela conductora.....	81
Figura 48. Oposición del Pulgar	83
Figura 49. Paradigma de programación funcional y Switch.....	84
Figura 50. Código Arduino sin App	85
Figura 51. Código Arduino con App	86
Figura 52. Pines de conexión Arduino y módulo Bluetooth.....	87
Figura 53. Monitor Serial Arduino configuración módulo Bluetooth	88
Figura 54. Conexión Arduino con App Móvil.....	89
Figura 55. Diagrama de flujo APP.....	90
Figura 56. Circuito actual prótesis mioeléctrica	91
Figura 57. Vista Función Agarre	92
Figura 58. Vista Función Típeo	93
Figura 59. Agarre	93
Figura 60. Típeo.....	94
Figura 61. Señales mioeléctricas persona sin amputación de miembro superior	95
Figura 62. Señales mioeléctricas persona con amputación de miembro superior	95

Introducción

La empresa 3D Ingeniería BQ es una empresa que nació en el año 2015 en Barranquilla a manos de un grupo de ingenieros mecánicos que buscaban suplir la necesidad de muchas personas y empresas en la ciudad, brindando la posibilidad de diseñar, fabricar, mejorar, reparar o simplemente personalizar un producto a un precio accesible en comparación con otras empresas a nivel nacional.

3D Ingeniería BQ se encuentra constituida por un equipo de trabajo altamente calificado, conformado por Javier Vargas ingeniero mecánico egresado de la Universidad del Norte y candidato a doctor en Ingeniería mecánica, Roberto Algarin ingeniero mecánico egresado de la Universidad del Atlántico y Magíster en Ingeniería Mecánica y, Luis López ingeniero mecánico egresado de la Universidad del Atlántico y Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte, que juntos suman más de 30 años de experiencia en el diseño en ingeniería, investigación e innovación, siendo así ganadores de diferentes convocatorias de Colciencias, SENA, Alcaldía de Barranquilla, entre otros.

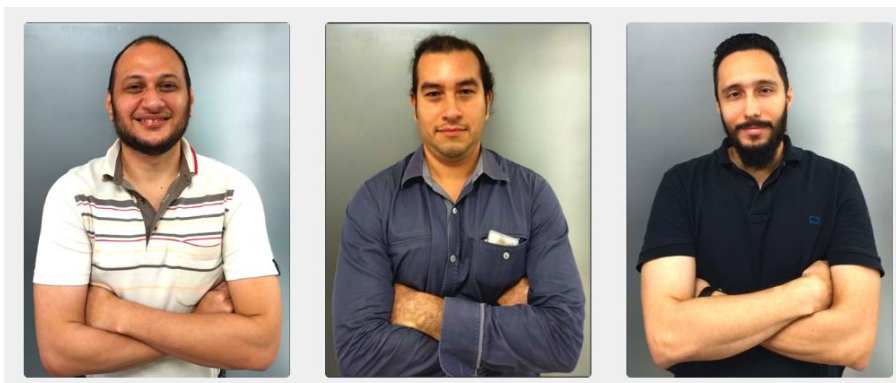


Figura 1. Ingenieros Roberto Algarín R., Luis López T. y Javier Vargas D. (respectivamente) fundadores de 3D Ingeniería BQ

Fuente: 3D Ingeniería BQ

Actualmente esta compañía se dedica principalmente a prestar servicios de diseño e impresión 3D, como también a la asesoría en la fabricación de prototipos industriales, universitarios y diseños personalizados.

Recientemente 3D Ingeniería BQ decidió crear un proyecto, el cual consiste en diseñar y fabricar una prótesis mioeléctrica de miembro superior a bajo costo, dado que, en el mundo, según la OMS, se estima que más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad; sólo en Colombia, según el censo realizado por el DANE en el 2005, se identificó que el 6.3% de la población presenta algún tipo de discapacidad, siendo la amputación de miembros superiores una de éstas; una de las soluciones que permite mejorar la calidad de vida de estas personas en condición de discapacidad es una prótesis que reemplaza el miembro faltante. En la elaboración de este proyecto la compañía recibió asesoría médica especial de la fundación CE CAMILO un centro de educación y rehabilitación para niños y jóvenes de escasos recursos con discapacidad, ubicada en el barrio La Paz de Barranquilla, que brindó a 3D Ingeniería BQ el enlace entre el usuario y el prototipo para realizar las diferentes pruebas.

La empresa decidió incluir en el equipo de trabajo del proyecto a un grupo de estudiante de la Universidad de la Costa, debido a la necesidad de contar con personal cualificado en el desarrollo y programación de circuitos electrónicos basados en microcontroladores, que le brindara el movimiento y las diferentes funciones a la prótesis.



Figura 2. Prótesis3D Ingeniería BQ

Fuente: 3D Ingeniería BQ

El proyecto inicia revisando el estado de la prótesis de miembro superior perteneciente a la empresa 3D Ingeniería BQ. Luego de conocer el estado del prototipo se procede a identificar, desde la perspectiva de la ingeniería electrónica y de sistemas, mejoras para su funcionamiento, analizando y estudiando soluciones presentes en el mercado e ideas propias. Identificadas las mejoras, prosigue la etapa de implementación de dichas mejoras. Posteriormente, la etapa de evaluación final del sistema electrónico, incluyendo pruebas con el equipo de ingenieros como usuarios hasta alcanzar un resultado satisfactorio y, por último, la realización de la prueba con una persona con amputación de miembro superior.

Para el desarrollo del proyecto se abordan tres ejes temáticos necesarios para fundamentar la presente investigación; el primero, se refiere a los aspectos relacionados con la anatomía y las deficiencias de miembro superior que conllevan discapacidad; el segundo, a los diferentes tipos de prótesis de extremidades superiores y; el tercero, a las principales tecnologías utilizadas en el desarrollo de prótesis electrónicas.

Planteamiento del problema

En la actualidad según la OMS (Organización Mundial de la Salud), se estima que más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad (OMS, 2011). Se conoce que esta cifra se encuentra en alza, debido, tanto al envejecimiento de la población, como al incremento global de problemas crónicos de salud como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y los trastornos mentales.

En Colombia, de acuerdo con el censo del 2005 realizado por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) se identificó que el 6.3% de la población presenta algún tipo de discapacidad, que corresponde a aproximadamente 2'624.898 personas, de las cuales a junio de 2018, solo 1'404.108 han sido caracterizadas a través del programa RLCPD (Registro de Localización y Caracterización de Personas con Discapacidad) del ministerio de Salud (MINSALUD, 2018).

Una de las discapacidades más comunes es la de extremidades superiores, la cual es reconocida, según la caracterización del RLCPD, como discapacidad con dificultad para llevar, mover, utilizar objetos con las manos. Generalmente las personas que sufren de esta discapacidad recurren a una prótesis para mejorar su calidad de vida, sin embargo, el costo de éstas es considerablemente elevado y su valor se ve incrementado mientras más compleja sea ésta.

Dentro de estas caracterizaciones realizadas por el RLCPD, se logran destacar tres en el aspecto económico las cuales son: personas con discapacidad sin ingresos (959.173), con ingresos inferiores a \$500.000 (305.948), con ingresos superiores a \$500.000 (71.165); también se tiene una población que no informa (50.013) y otra que decidió no reportarlo (105.124) (MINSALUD, 2020). Con esto se puede apreciar que la limitación económica es un problema

adicional para esta población, porque es más difícil para ellos acceder a un empleo con una remuneración económica adecuada a causa de su condición.

En la ciudad de Barraquilla la empresa 3D Ingeniería BQ quiere hacer parte de la solución de este problema, para lo cual decidieron crear una prótesis de miembro superior de bajo costo. El diseño de la prótesis ya se encuentra implementado e impreso en 3D, en fase de prototipado y prueba, porque no se ha podido integrar de la mejor forma la señal nerviosa muscular con la respuesta de los dedos de la prótesis.

Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado surge la siguiente pregunta problema:

¿Cómo automatizar una prótesis impresa en 3D, para integrar de la mejor forma la señal nerviosa muscular con la respuesta de los dedos de la prótesis, para las personas en condición de discapacidad de miembro superior?

Justificación

El presente proyecto se realiza con el objetivo de brindar una solución que permita mejorar la calidad de vida para aquellas personas que están en condición de discapacidad de extremidades superiores. La adquisición del producto final se realizará con una poca inversión en comparación a las diferentes alternativas ofrecidas en el mercado.

La solución que se propone consiste en desarrollar un sistema electrónico, que realice funciones básicas de la mano humana en una prótesis de miembro superior, controlada por una aplicación móvil desarrollada en Xamarin, por medio de la cual el usuario le comunicará al Arduino la función que desea realizar.

El principal beneficio del proyecto es su bajo costo, siendo este último, nuestro factor diferenciador con respecto a las múltiples prótesis que se encuentran disponibles actualmente en el mercado. Debido a esto, se optó por desarrollar el diseño del sistema con Arduino y Xamarin,

plataformas de código libre, es decir, que no requieren comprar algún tipo de licencia para su uso y distribución.

Objetivos

Objetivo general

Mejorar un sistema electrónico que permita la realización de funciones básicas de la mano humana, en prótesis de miembro superior de bajo costo

Objetivos específicos

- Revisar el estado actual de la prótesis mioeléctrica de miembro superior, disponible en la empresa 3D Ingeniería BQ.
- Identificar alternativas de mejora para el funcionamiento de la prótesis de la empresa 3D Ingeniería BQ.
- Implementar las funcionalidades más importantes.
- Desarrollar una aplicación móvil que se comunique con el Arduino, para que el usuario tenga otra opción de uso de la prótesis.
- Evaluar el sistema electrónico final para corroborar el correcto funcionamiento de la prótesis.

Marco conceptual

Se han identificado tres ejes temáticos que es necesario documentar para fundamentar la presente investigación; el primero, se refiere a los aspectos relacionados con la anatomía y las deficiencias de miembro superior que conllevan discapacidad; el segundo, a los diferentes tipos de prótesis de extremidades superiores y; el tercero, a las principales tecnologías utilizadas en el desarrollo de prótesis electrónicas.

Primeramente, se efectúa una investigación detallada de la anatomía de las extremidades superiores, los músculos que son los encargados de realizar los movimientos voluntarios del cuerpo y la técnica que permite el estudio muscular a través de señales eléctricas. En cuanto a los índices de discapacidad, es necesario analizar las diferentes estadísticas gubernamentales de las métricas de discapacidad en Colombia que nos proporciona Minsalud, el DANE y Ministerio de la Protección Social, esto con el fin de conocer la importancia de este tema en el país.

De igual forma, se realiza una investigación de los diferentes tipos de prótesis y los múltiples beneficios que aportan éstas, dependiendo de su complejidad y tecnología; como es el caso de prótesis desarrolladas por empresas como Ottobock y Össur hf y; a nivel académico, como los proyectos y/o trabajos de grado desarrollados en universidades, en los cuales se utilizan tecnologías alternativas. Dentro de los tipos de prótesis tenemos: pasiva, mecánica, eléctrica, mioeléctrica e híbridas.

Complementariamente, se documenta una serie de fundamentos con las principales tecnologías utilizadas en el diseño y desarrollo de las prótesis a nivel comercial, como es el caso de tarjetas de hardware empotrado como Arduino, Raspberry Pi y Beagleboard, resaltando las ventajas y desventajas de cada una de estas tecnologías. Se analizan también los sensores mioeléctricos como el muscle sensor v3 y el Myoware muscle sensor; y los actuadores, como el

servomotor lineal PQ12-R, el servomotor lineal L16-R y el servomotor MG996, con el objetivo de realizar una comparación y determinar cuál es el más adecuado para el prototipo, de acuerdo con las ventajas que estos proveen con respecto a los demás.

Por último, se hace una descripción de la tecnología utilizada en su construcción a nivel físico, como es el caso de la parte mecánica que fue diseñado con la tecnología de impresión 3D.

Fundamentos relacionados con la anatomía y deficiencias de miembro superior que conllevan discapacidad

Anatomía de la mano

La mano es el órgano terminal de las extremidades superiores, cuenta con una estructura compleja compuesta por 27 huesos, más de 20 articulaciones y más de 30 músculos, lo que hace que en un área tan pequeña converjan tejidos blandos y duros al mismo tiempo, es una de las partes del cuerpo que más interactúa con el medio y por tal razón facilita la realización de la mayoría de las tareas diarias, es una de los principales diferencias entre el hombre y la mayoría de los animales.

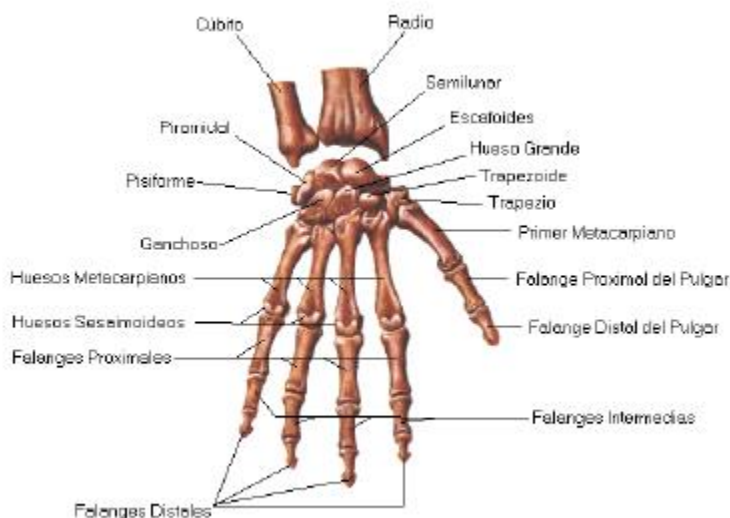


Figura 3. Estructura ósea de la mano Fuente: (Casañas, 2014)

La anatomía de la mano le otorga al ser humano una gran cantidad de funciones y posturas diversas adaptables a las necesidades y actividades que realiza una persona. Entre las principales acciones de la mano encontramos: tomar y soltar objetos, con la palma, en forma de pinza, facilitan la manipulación de instrumentos de precisión, defensa personal, lenguaje de seña. La realización de estas actividades es indispensable a la hora de elegir un candidato para una tarea, son pocas y difícil de imaginar las actividades que no involucren las manos



Figura 4. Falanges y articulaciones del dedo índice

Fuente:(Nunoo et al., 2010)

Músculos

El cuerpo humano consta de 3 tipos de músculos: cardíacos, lisos y esqueléticos, siendo este últimos nuestro tema de interés. Los músculos esqueléticos representan el 40% del peso corporal y se encargan de realizar los movimientos voluntarios del cuerpo. Es capaz de convertir energía química en mecánica y calor, gracias a la reacción del substrato orgánico y el oxígeno. Su propiedad más importante para este estudio, es la capacidad de contraerse, lo cual conlleva cambios en su estructura y propiedades mecánicas ante la estimulación eléctrica efectuada por los nervios voluntarios (Gustavo & Segal, 2019).

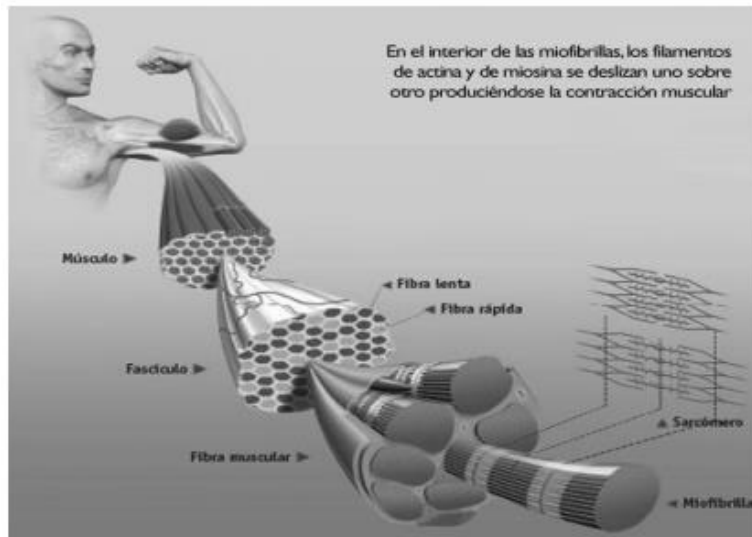


Figura 5. Composición muscular

Fuente: (Bermeo Varon et al., 2019)

Para hablar de la composición del músculo empezaremos por el tejido muscular que está compuesto por fibras, que se constituyen de miofibrillas, que a su vez están formadas por miofilamentos pequeños, hilos hechos de dos proteínas distintas: miosina y actina. La actina se entrelaza con la miosina, formando una especie de puentes que más adelante servirán para tirar de los filamentos y contraer el músculo (Bermeo Varon et al., 2019).

Electromiografía

La electromiografía (EMG) es la técnica que permite el estudio muscular a través del registro de su actividad eléctrica durante la contracción. La señal EMG es generada por la actividad eléctrica de las fibras musculares activas, la suma de estos potenciales se denomina potenciales de acción de la unidad motora, y es responsable de la contracción muscular.

La diferencia de potencial generada por los músculos es captada por electrodos ubicados en la piel. Lo más común es el uso de tres electrodos, dos electrodos en la zona del músculo que se contraerá y el restante conocido como referencia, se ubica cerca de un hueso.

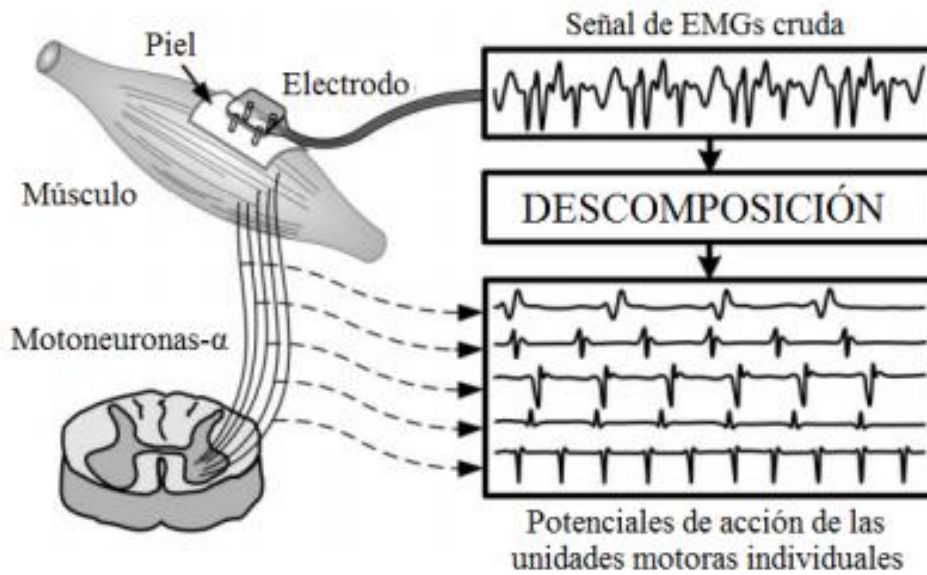


Figura 6. Electromiografía

Fuente: (Gustavo & Segal, 2019)

Uno de los aspectos más importante en la electromiografía es el tratamiento de las señales ya que éstas son afectadas por el ruido, entre las principales fuentes de ruido encontramos: ruido del equipo, inestabilidad de la señal, movimientos de los electrodos, el ambiente. Luego de recibir la señal, pasa por el proceso de rectificación, el cual consiste en tomar los valores absolutos (positivos) de la misma, para posteriormente ser filtrada para eliminar las diversas fuentes de ruidos; como resultado de esto obtenemos la señal que se estudiará, también conocida como una señal suavizada (Gustavo & Segal, 2019).

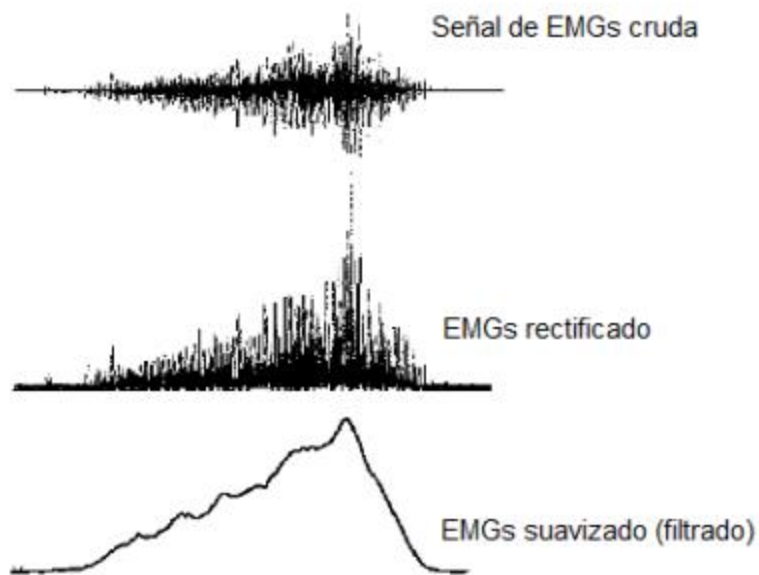


Figura 7. Tratamiento de señales EMG

Fuente: (Gustavo & Segal, 2019)

Discapacidad en miembro superior

A lo largo de la historia, el término discapacidad ha sufrido una constante evolución; según la fundación Adecco el concepto de discapacidad en las culturas antiguas se asociaba a intervenciones de poderes sobrehumanos o castigos divinos, siendo una condición que generaba rechazo y aislamiento, ya en el siglo XV esta creencia se secularizó y aparecieron las primeras instituciones denominadas manicomiales (siendo visto esto como algo discriminatorio y estigmatizante).

A principios del siglo XX la discapacidad se comienza a percibir desde un enfoque asistencial, se crean los primeros centros de educación especial, pero desde una perspectiva excesivamente paternalista (sobreprotectora), que refuerza la dependencia y las actitudes de discriminación social y laboral, ésta se ve reforzada después de la II Guerra Mundial, con la

aparición de numerosas discapacidades sobrevenidas; por primera vez algunas personas con discapacidad son consideradas héroes.

En la segunda mitad del siglo XX aparecen las primeras asociaciones formadas por personas con discapacidad y sus familias que se unen para defender sus derechos adquiriendo así más presencia en la agenda política.

En España, en el año 1982 se produce un punto de inflexión con la aprobación de la LISMI (Ley de Integración Social del Minusválido), hoy llamada Ley General de la Discapacidad, que reconoce los derechos de las personas con discapacidad y establece, por primera vez, la obligatoriedad de incorporar un porcentaje no inferior al 2% de trabajadores con discapacidad en las empresas de más de 50 trabajadores.

Sin embargo, no es hasta la entrada en el segundo milenio (década 2000) cuando comienza a abandonarse la perspectiva asistencial y paternalista, que concibe a la persona con discapacidad como dependiente, inactiva e improductiva, para evolucionar hacia un nuevo enfoque en el que la persona con discapacidad cuenta con habilidades, competencias, recursos y potencialidades, si se le brindan los apoyos necesarios (ROMERO, 2018).

En la actualidad, según la OMS, la discapacidad es un término general que abarca las deficiencias, las limitaciones de la actividad y las restricciones de la participación. Las deficiencias son problemas que afectan a una estructura o función corporal; las limitaciones de la actividad son dificultades para ejecutar acciones o tareas y; las restricciones de la participación son problemas para participar en situaciones vitales. Por consiguiente, la discapacidad es un fenómeno complejo que refleja una interacción entre las características del organismo humano y las características de la sociedad en la que vive (OMS, 2016).

Estadística discapacidad en Colombia

En el mundo, según la OMS, se estima que más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad (OMS, 2011), es decir, alrededor del 15% de la población mundial; se conoce que estas cifras se encuentran en alza constante, a causa del envejecimiento de la población, puesto que las personas ancianas tienen un mayor riesgo de discapacidad; como también, al incremento global de los problemas crónicos de salud asociados a discapacidad, como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y los trastornos mentales.

En Colombia de acuerdo con el Censo del 2005 realizado por el DANE se identificó que el 6.3% de la población presenta algún tipo de discapacidad, que corresponde a aproximadamente 2'624.898 de personas, de las cuales a junio de 2018, solo 1'404.108 han sido caracterizadas a través del programa RLCPD (Registro de Localización y Caracterización de Personas con Discapacidad) (MINSALUD, 2018). El DANE transfirió la tarea de realizar el registro para la localización y caracterización de las personas con discapacidad al Ministerio de la Protección Social, el primero de noviembre del 2010 (DANE, 2010).

El Ministerio de la Protección Social utiliza el programa RLCPD (Registro de Localización y Caracterización de Personas con Discapacidad), que es básicamente una herramienta que permite recoger vía web información sobre dónde están y cómo viven las personas con algún tipo de discapacidad residentes en Colombia. Esta base de datos única también permite la actualización de los datos, por ejemplo, en caso de cambio de domicilio o variación del estado de salud. Los objetivos principales de esta herramienta son:

- Conocer el número de personas con discapacidad y las condiciones en que viven a nivel departamental, distrital y municipal, con el fin de planificar acciones para suplir las necesidades de esta población.

- Disponer de una información veraz sobre las personas con discapacidad, lo que permite ejecutar adecuadamente programas y proyectos en favor de esta población a nivel municipal, departamental /distrital y nacional.
- Identificar cuáles son las acciones inclusivas que se pueden generar a nivel departamental, distrital y municipal con el fin de equiparar las oportunidades para la población con discapacidad.(RLCPD, 2013)

En la actualidad de acuerdo con el DANE en Colombia existen aproximadamente 48.258.494 personas y a la fecha corte de marzo de 2020 en la herramienta RLCPD se han registrado 1'549.988 personas en condición de discapacidad.

Discapacidad en Colombia



Figura 8. Grafica de personas con discapacidad en Colombia

Fuente: (RLCPD, 2020) (MINSALUD, 2020)

A su vez, en el departamento del Atlántico existen aproximadamente 2.604.000 personas y a la fecha corte de marzo de 2020, en la herramienta RLCPD se han registrado 45.570 personas en condición de discapacidad en este departamento.

Discapacidad en el Departamento del Atlántico



Figura 9. Grafica de personas con discapacidad en el Atlántico

Fuente: (RLCPD, 2020) (MINSALUD, 2020)

Esta herramienta además de llevar una base de datos sobre las personas con algún tipo de discapacidad, también se ha visto en la tarea de clasificarlas en 43 diferentes ítems, siendo los más relevantes para nuestro proyecto los siguientes:

- Porcentaje de personas en condición de discapacidad sin ingresos.

En este ítem de acuerdo con el RLCPD se puede apreciar que:

En Colombia existen aproximadamente 996.774 personas en condición de discapacidad (PcD) que no cuentan con un ingreso económico.

En el departamento del atlántico el 56,71% de las personas en condición de discapacidad en este departamento, es decir, 25.843 PcD no cuentan con ingresos económicos.

- Porcentaje de personas en condición de discapacidad con ingresos mensuales promedio inferior a 500.000 pesos.

En este ítem de acuerdo con el RLCPD se puede apreciar que:

En Colombia existen aproximadamente 309.600 personas en condición de discapacidad que cuentan con un ingreso promedio económico inferior a 500.000 pesos.

En el departamento del Atlántico el 16,16% de las personas en condición de discapacidad en este departamento, es decir, 7.364 PcD cuentan con un ingreso promedio económico inferior a 500.000 pesos.

- Porcentaje de personas en condición de discapacidad con ingresos mensuales promedio mayor a 500.000 pesos.

En este ítem de acuerdo con el RLCPD se puede apreciar que:

En Colombia existen 76.434 personas en condición de discapacidad que cuentan con un ingreso promedio económico superior a 500.000 pesos.

En el departamento del Atlántico el 2,92% de las personas en condición de discapacidad, es decir, aproximadamente 1.331 PcD cuentan con un ingreso promedio económico superior a 500.000 pesos.

- Porcentaje de personas con discapacidad con dificultad permanente para llevar, mover, utilizar objetos con las manos

En este ítem de acuerdo con el RLCPD se puede apreciar que:

En Colombia existen 303.971 personas que presentan discapacidad con dificultad permanente para llevar, mover, utilizar objetos con las manos.

En el departamento del Atlántico el 15,55% de la población en condición de discapacidad, es decir, 7.087 personas presentan discapacidad con dificultad permanente para llevar, mover, utilizar objetos con las manos.

Teniendo en cuenta las anteriores estadísticas tomadas del sitio web del RLCPD con fecha corte (marzo 2020), se puede apreciar que en Colombia existe un gran número de personas que sufren de discapacidad con dificultad permanente para llevar, mover, utilizar

objetos con las manos, como también se puede apreciar que la gran mayoría sufre de problemas económicos. (RLCPD, 2020) (MINSALUD, 2020)

Tipos de prótesis en el mercado

Revisión de la literatura

A lo largo de la historia, muchas prótesis robóticas de miembro superior mioeléctricas han sido creadas, principalmente, por compañías especializadas en tecnología e instituciones de educación superior, con el objetivo de crear un producto para su comercialización y/o para la realización de trabajos académicos. A continuación, se presentarán algunos de estos trabajos, con el fin de dar a conocer los diferentes prototipos e investigaciones que se han realizado sobre este tema en los últimos años.

En Popayán Colombia, en el año 2010, en la Universidad del Cauca, el estudiante de maestría Cesar Augusto Quinarás, diseñó y desarrolló una prótesis de miembro superior adaptada a varios agarres, utilizando sensores de posición angular, sensores de fuerza, el Kit de desarrollo dsPICDEM 1.1 Plus, como también diseñó una interfaz de su prototipo en el software labview (Nunoo et al., 2010).

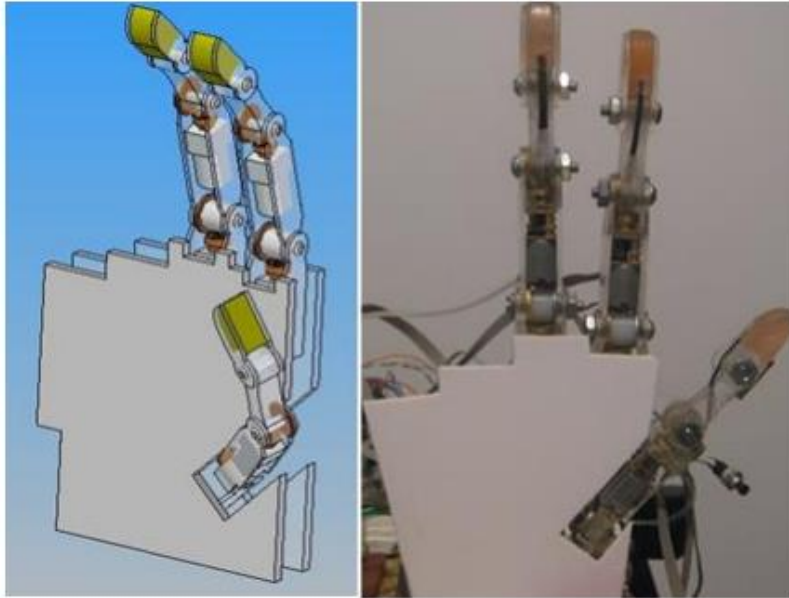


Figura 10. Prótesis Universidad del cauca.

Fuente: (Nunoa et al., 2010)

En Ciudad Juárez México, en el año 2019, en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, un grupo de estudiantes desarrollaron y construyeron una prótesis de mano, controlada por medio de un sensor mioeléctrico de la placa MyoWare, que envía una señal EMG a un controlador que acciona dos servomotores, los cuales mueven los dedos de la prótesis.

Analizando un poco los dispositivos que se utilizaron en la construcción de este prototipo se pudo identificar que:

En la parte de los sensores, al igual que en este proyecto, ellos utilizaron el mismo tipo de sensor mioeléctrico Myoware AT-04-001 debido a su alta precisión y fidelidad al momento de tomar las señales.

En la parte del microcontrolador, ellos también optaron por la tecnología Arduino, sin embargo, en el documento no se especifica directamente cual referencia de microcontrolador utilizaron, pero en los esquemáticos se puede apreciar que se utilizó la referencia Arduino Uno.

En la parte de los actuadores, a diferencia de este proyecto, ellos solo optaron por utilizar dos servomotores, siendo uno para el dedo pulgar y el otro para el resto de los dedos (Meñique, anular, corazón e índice). También se puede apreciar que se hizo uso de una referencia diferente, un servomotor modelo MG996R. (Palacios Andrés et al., 2019).



Figura 11. Prótesis Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Fuente: (Palacios Andrés et al., 2019).

En São Paulo Brasil, en el año 2020, en la Escuela de Comunicaciones y Artes de la Universidad de São Paulo, un grupo de estudiantes realizaron el diseño y desarrollo de una prótesis de miembro superior mioeléctrica de bajo costo. Ésta fue diseñada con ayuda de la tecnología de la impresión 3D, la tecnología Arduino y un sensor mioeléctrico (Muscle sensor V3)

Analizando un poco los dispositivos que se utilizaron en la construcción de este prototipo, se pudo identificar que:

En la parte de los sensores, este grupo de estudiantes utilizó un sensor mioeléctrico Muscle sensor V3, el cual es la versión anterior al sensor utilizado para el desarrollo del prototipo de este proyecto, MyoWare Muscle Sensor AT-04-001.

En la parte del microcontrolador, ellos también optaron por la tecnología Arduino, utilizando la misma referencia que el prototipo de este proyecto, la referencia Nano, debido a su pequeño tamaño en comparación con las demás referencias.

En la parte de los actuadores, a diferencia de este proyecto, ellos optaron por utilizar 4 servomotores en lugar de 5, además, se puede apreciar que se hizo uso de una referencia diferente, un servomotor 9g.

En la parte del socket o la cubierta física del prototipo, al igual que en este proyecto, ellos aprovecharon las ventajas de la impresión 3D en términos de economía y flexibilidad. (*da Silva et al., 2020*).



Figura 12. Prótesis Escuela de Comunicaciones y Artes de la Universidad de São Paulo.

Fuente: (da Silva et al., 2020).

Una empresa alemana llamada Ottobock desarrolló la prótesis denominada Michelangelo, una prótesis mioeléctrica que ofrece una gran variedad de funciones o agarres como: la pinza lateral, agarre fuerte lateral, palma abierta, modo neutral, pinza tridigital, abducción/aducción de los dedos y agarre fuerte en posición. Es una prótesis desarrollada con las tecnologías más modernas (Ottobock, 2013).



Figura 13. Prótesis Michelangelo

Fuente: (Ottobock, 2013)

La empresa Alemana Ottobock desarrolló la denominada Mano bebionic, una prótesis mioeléctrica que cuenta con 14 patrones de agarre y posiciones de mano, la mano artificial bebionic se ha diseñado para llevar a cabo prácticamente cualquier actividad de un día cualquiera: desde comer y llevar bolsas hasta abrir puertas, encender y apagar luces o teclear (Ottobock, 2014).



Figura 14. Prótesis bebionic

Fuente: (Ottobock, 2014)

Una empresa islandesa llamada Össur hf. desarrolló la denominada i-Limb Ultra, una prótesis mioeléctrica multi-articulada, con cinco dígitos accionados individualmente que cuenta con 18 diferentes opciones de agarre automatizado disponibles, cuenta con una función de seguridad contra caídas para mayor tranquilidad (Össur, 2020).



Figura 15. Prótesis i-Limb Ultra

Fuente: (Össur, 2020)

Prótesis pasiva

También son conocidas por el nombre de prótesis estéticas o cosméticas ya que no tienen ningún movimiento y solo cubren el aspecto estético del miembro amputado. Para su proceso de fabricación se emplean menos piezas que los otros tipos de prótesis, utiliza materiales livianos y que requieren menos mantenimiento como: PVS rígido, látex flexible o silicona. (Nunoa et al., 2010)



Figura 16. Prótesis estética

Fuente: (Brito et al., 2013)

Prótesis mecánica

Las prótesis mecánicas se usan con la función de cierre o apertura voluntario por medio de una señal mecánica que es obtenida de miembros del cuerpo como el hombro o codo. Utiliza un sistema de Resortes, el cual se basa en la extensión de una liga por medio de un arnés para obtener una fuerza de presión significativa para la apertura y cierre de la mano, para el agarre de objetos grandes y redondos. Estos elementos son recubiertos por un guante para darle una apariencia más estética a la prótesis, lo que impide sujetar objetos pequeños.

El tamaño de la prótesis y las ligas que componen la prótesis depende de la fuerza y materiales de fabricación, otro factor que lo determina es la necesidad de la persona. (Loaiza, 2012)

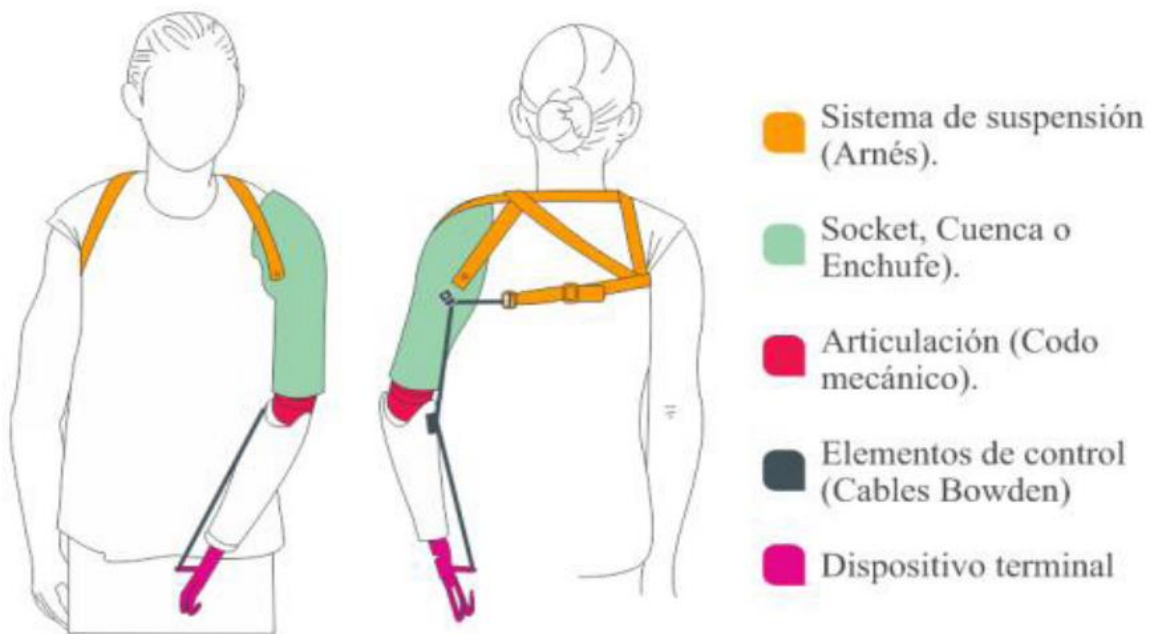


Figura 17. Prótesis Mecánica

Fuente: (Brito et al., 2013)

Prótesis eléctrica

Estas prótesis utilizan motores o servomotores en los terminales que sustituirán, y son controladas por medio de uno o varios dispositivos electrónicos, como pulsadores e interruptores, entre otros. Entre sus desventajas destacan su elevado costo de adquisición y reparación, la cual se hace más necesaria dependiendo de los ambientes hostiles a los que sea sometido la prótesis.

(Loaiza, 2012)



Figura 18. Prótesis Eléctrica

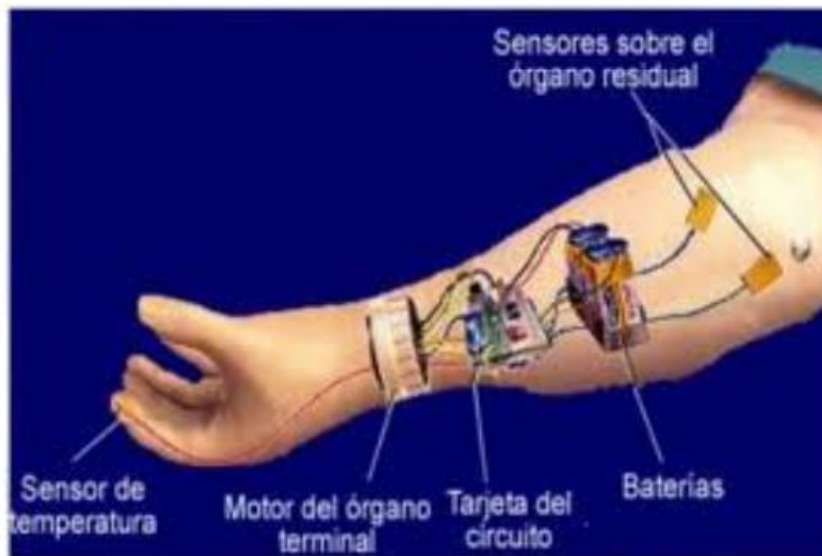
Fuente: (Loaiza, 2012)

Prótesis mioeléctrica

Las prótesis mioeléctricas poseen el más alto grado de rehabilitación en prótesis, son las mismas eléctricas, pero no son controladas por pulsadores o interruptores, sino que son controladas por una interfaz mioeléctrica. Esta tecnología se basa en las pequeñas señales

eléctricas entre 5 y 20 μV (EMG) que se generan por la interacción química en el cuerpo al contraer los músculos. Las señales se registran por medio de electrodos, los cuales amplifican y envían la señal a un controlador que, dependiendo de ésta, envía señales de activación o desactivación a los motores o servomotores para que puedan realizar un movimiento.

Entre las ventajas de esta prótesis encontramos que requieren pequeños movimientos para su funcionamiento y entre sus desventajas encontramos las mismas de las prótesis eléctricas, que son los elevados costos de adquisición y reparación y la exposición a ambientes hostiles. (Loaiza,



2012)

Figura 19. Prótesis mioeléctrica

Fuente: (Brito et al., 2013)

Prótesis híbridas

Como su nombre lo indica, las prótesis híbridas son la combinación de dos de los tipos de prótesis vistos anteriormente. Por lo general este tipo de prótesis no es tan común ya que solo se utiliza en amputaciones arriba del codo, ya que se requiere controlar dos terminales como puede ser el caso de la mano y el codo. Lo más común es que el codo sea accionado por un mecanismo mecánico mientras que la mano sea controlada por un mecanismo mioeléctrico. (Loaiza, 2012)



Figura 20. Prótesis Híbrida

Fuente: (Loaiza, 2012)

Principales tecnologías utilizadas en el desarrollo de prótesis electrónicas

Microcontroladores arduino

Los microcontroladores Arduino son tarjetas de hardware empotrado, cada una de éstas cuentan con un microcontrolador generalmente Atmel AVR y a su vez con diferentes puertos de comunicación digitales y análogos que pueden ser configurados como entrada y/o salidas. A continuación, veremos algunas de las tarjetas más comunes y populares en el mercado.

Arduino Uno Rev3.



Figura 21. Arduino Uno Rev3

Fuente: (Arduino, 2020d)

Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usados como PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión USB, conector jack de alimentación y un botón de reinicio. Tiene toda la electrónica necesaria para que el microcontrolador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB o con un transformador AC-DC, es la opción más usada y con mayor cantidad de documentación de toda la familia Arduino (Arduino, 2020d)

Tabla 1.

Especificaciones Arduino UNO

Especificaciones	Descripción
Microcontrolador	ATMega328p
Voltaje de operación	5V
Pines	14 (6 son PWM)
Pines análogos	8
Memoria Flash	32KB
Conector de alimentación	Jack para alimentación DC Conector tipo B para alimentación y transferencia de datos
Dimensiones	5.34cm (ancho) 6.86cm (largo)
Peso	25g
Precio	\$ 22.00 (USD)

Fuente: (Arduino, 2020d)

Arduino Mega.

Figura 22. Arduino Mega Fuente: (Arduino, 2020b)

El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un cristal de 16Mhz, conexión USB, jack para alimentación DC y un botón de reseteo. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de shields compatibles para Arduino UNO (Arduino, 2020b).

Tabla 2.

Especificaciones Arduino Mega

Especificaciones	Descripción
Microcontrolador	ATMega2560
Voltaje de operación	5V
Pines	54 (14 son PWM)
pines análogos	16
Memoria Flash	256KB
Conectores	Jack para alimentación DC Conector tipo B para alimentación y transferencia de datos
Dimensiones	5.33cm (ancho) 10.16cm (largo)
Peso	37g
Precio	\$38.50 (USD)

Fuente: (Arduino, 2020b)

Arduino Nano.

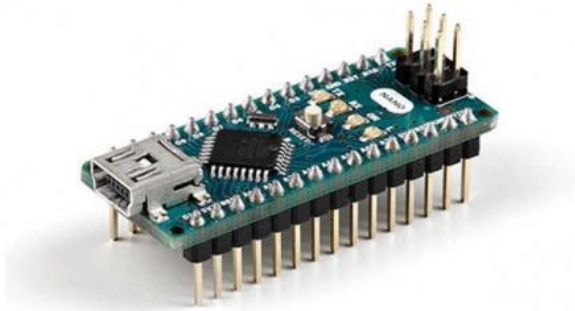


Figura 23. Arduino Nano

Fuente: (Arduino, 2020c)

Arduino Nano es una placa de desarrollo de tamaño compacto, completa y compatible con protoboards, basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usados como PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión Mini-USB y un botón de reseteo.

Posee las mismas capacidades que un Arduino UNO, tanto en potencia del microcontrolador como en conectividad, sólo se ve recortado en su conector USB, conector jack de alimentación, el cual utiliza un conector tipo mini B en lugar del convencional (tipo B)(Arduino, 2020c).

Tabla 3.

Especificaciones Arduino Nano

Especificaciones	Descripción
Microcontrolador	ATMega328
Voltaje de operación	5V
Pines	14 (6 son PWM)
Pines análogos	8
Memoria Flash	32KB
Conector de alimentación	Mini B
Dimensiones	1.85cm (ancho) 4.31cm (largo)
Peso	7g
Precio	\$ 22.00 (USD)

Fuente: (Arduino, 2020c)

Tabla 4.

Comparación entre Arduino UNO, MEGA2560 y NANO

Arduino	UNO	MEGA 2560	NANO
Microcontrolador	ATMega328p	ATMega2560	ATMega328
Voltaje de operación	5V	5V	5V
Pines	14 (6 son PWM)	54 (14 son PWM)	14 (6 son PWM)
Pines análogos	8	16	8
Memoria Flash	32KB	256KB	32KB
Conector de alimentación	Jack para alimentación DC ICSP Conector tipo B para alimentación y transferencia de datos	Jack para alimentación DC. Conector tipo B para alimentación y transferencia de datos	Mini B
Dimensiones	5.33cm (ancho) 6.86cm (largo)	5.33cm (ancho) 10.16cm (largo)	1.85cm (ancho) 4.31cm (largo)
peso	25g	37g	7g
Precio	\$ 22.00 (USD)	\$ 38.50 (USD)	\$ 22.00 (USD)

Fuente: Propia

Raspberry Pi

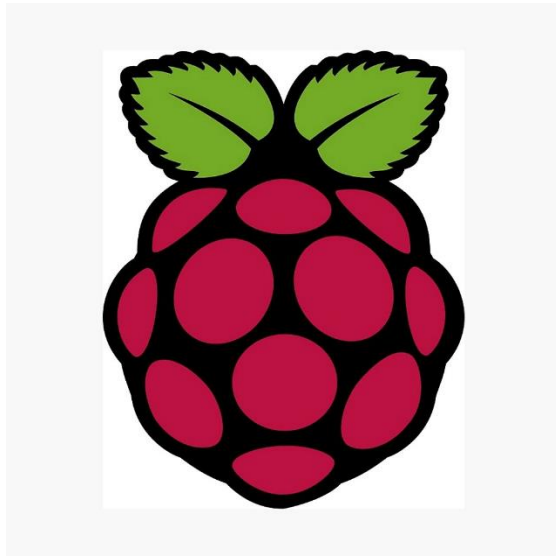


Figura 24. Raspberry Pi

Fuente: (Raspberry, 2012)

La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo y con un tamaño compacto, del porte de una tarjeta de crédito, puede ser conectada a un monitor de computador o un TV, y usarse con un ratón y teclado estándar. Fue creada en febrero del 2012 por la Raspberry Pi Foundation, Es un pequeño computador que corre un sistema operativo linux capaz de permitirle a las personas de todas las edades explorar la computación y aprender a programar lenguajes como Scratch y Python. Es capaz de hacer la mayoría de las tareas típicas de un computador de escritorio, desde navegar en internet, reproducir vídeos en alta resolución, manipular documentos de ofimática, hasta reproducir juegos.

Además, la Raspberry Pi tiene la habilidad de interactuar con el mundo exterior, puede ser usada en una amplia variedad de proyectos digitales, desde reproductores de música y video, estaciones meteorológicas hasta cajas de aves con cámaras infrarrojas.(Raspberry, 2012)

A continuación, se presentarán brevemente algunas de sus tarjetas más populares:

Raspberry Pi 4 Model B.



Figura 25. Raspberry Pi 4 Model B

Fuente: (Raspberry, 2020)

Esta es la última y más moderna tarjeta lanzada a la fecha (junio 2020) por la fundación Raspberry Pi. Esta tarjeta ofrece un innovador incremento en la velocidad de procesamiento, rendimiento multimedia, memoria y conectividad en comparación con sus predecesoras. Esta tarjeta proporciona un rendimiento comparable con los sistemas de Pc de x86 o 32 bits de nivel básico. (Raspberry, 2020)

Tabla 5.

Especificaciones Raspberry Pi 4 Model B

Especificaciones	Descripción
Procesador	Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
Memoria	2GB, 4GB or 8GB LPDDR4
Conectividad	2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN (Wifi) Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethernet 2 × USB 3.0 ports 2 × USB 2.0 ports.
GPIO	Standard 40-pin GPIO header (compatible con las placas anteriores)
Multimedia	H.265 (4Kp60 decode); H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode); OpenGL ES, 3.0 graphics
Audio y video	2 × micro HDMI ports (up to 4Kp60 supported) 2-lane MIPI DSI display port 2-lane MIPI CSI camera port 4-pole stereo audio and composite video port
Soporte de SD card	Ranura para tarjeta microSD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos

Fuente: (Raspberry, 2020)

Raspberry Pi 3 Model B+.

Figura 26. Raspberry Pi 3 Model B+

Fuente: (Raspberry, 2018b)

Esta tarjeta es el último producto de la gama Raspberry Pi 3, cuenta con un procesador de cuatro núcleos de 64 bits que funciona a 1,4 GHz, doble banda de 2,4 GHz, ésta fue y sigue siendo una de las tarjetas más populares debido a sus características que veremos a continuación.

(Raspberry, 2018b)

Tabla 6.

Especificaciones Raspberry Pi 3 Model B+

Especificaciones	Descripción
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz
Memoria	1GB LPDDR2 SDRAM
Conectividad	2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN Bluetooth 4.2, BLE Gigabit Ethernet over USB 2.0 (maximum throughput 300Mbps) 4 × USB 2.0 ports
GPIO	Extended 40-pin GPIO header
Multimedia	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
Audio y video	1 × full size HDMI MIPI DSI display port MIPI CSI camera port 4 pole stereo output and composite video port
SopORTE de SD card	Ranura para tarjeta microSD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos

Fuente: (Raspberry, 2018b)

Raspberry Pi 3 Model A+.

Figura 27. Raspberry Pi 3 Model A+ Fuente: (Raspberry, 2018a)

Al igual que la Raspberry Pi 3 Modelo B +, cuenta con un núcleo cuádruple de 64 bits, procesador que funciona a 1,4 GHz, banda dual de 2,4 GHz y 5 GHz inalámbrico LAN y Bluetooth 4.2 / BLE. Este modelo cuenta con la misma huella mecánica que la Raspberry Pi 1 Model A+.

Tabla 7.

Especificaciones Raspberry Pi 3 Model A+

Especificaciones	Descripción
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz
Memoria	512MB LPDDR2 SDRAM
Conectividad	2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN Bluetooth 4.2, BLE 1x USB port
GPIO	Extended 40-pin GPIO header
Multimedia	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
Audio y video	1 × full size HDMI MIPI DSI display port MIPI CSI camera port 4 pole stereo output and composite video port
SopORTE de SD card	Ranura para tarjeta micro SD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos

(Raspberry, 2018a)

Fuente: (Raspberry, 2018a)

Beagleboard

Al igual que Raspberry Pi, Beagleboard son computadoras de una sola placa de bajo costo sin sistema de ventilación, basadas en procesadores Texas Instruments de baja potencia que cuentan con el núcleo de la serie ARM Cortex-A. Estas tarjetas fueron creadas por la Fundación BeagleBoard.org, la cual es una corporación sin fines de lucro con sede en Michigan, EE. UU., que brinda educación y colaboración en torno al diseño y uso de software y hardware de código

abierto en la informática integrada. Estas tarjetas cuentan con toda la capacidad de expansión de las computadoras de escritorio actuales, pero sin el volumen, los gastos o el ruido. (BeagleBoard, 2019a)

A continuación, veremos algunas de las tarjetas más populares.

BeagleBone Black.

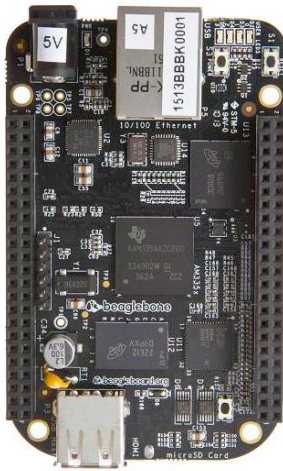


Figura 28. BeagleBone Black

Fuente: (BeagleBoard, 2019c)

BeagleBone Black es una plataforma de desarrollo de bajo costo y apoyada por la comunidad para desarrolladores y aficionados. (BeagleBoard, 2019c)

A continuación, algunas características principales

Tabla 8.

Especificaciones BeagleBone Black

Especificaciones	Descripción
Procesador	AM3358

	ARM Cortex-A8
Velocidad máxima del procesador	1GHz
Co procesadores	2x200-MHz PRUs, ARM Cortex-M3, SGX PowerVR
Memoria	512MB DDR3 (800MHz x 16), 4GB on-board storage using eMMC, ranura microSD
Puertos digitales	65 (3.3V)
Puertos análogos	7 (1.8V)
USB	USB 2.0 480Mbps Host/Client Port, USB 2.0 Host Port
Conexión	10/100 Ethernet
Video	microHDMI, cape add-ons
Audio	microHDMI, cape add-ons
Sensores integrados	Ninguno

Fuente: (BeagleBoard, 2019d)

BeagleBone Blue.

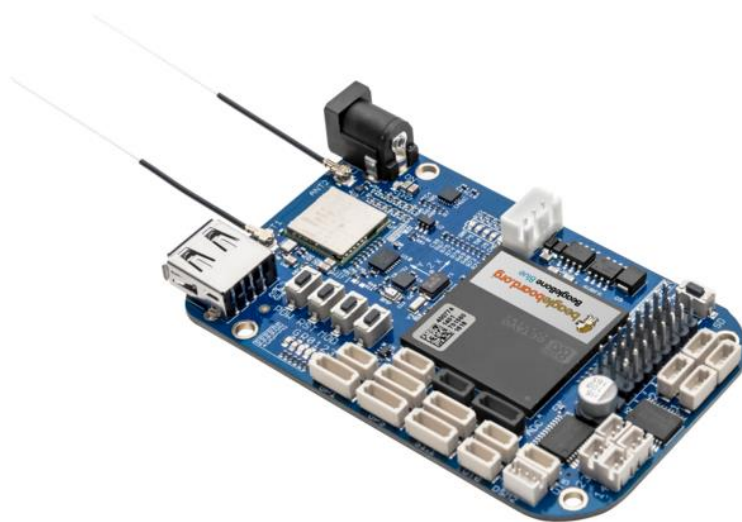


Figura 29. BeagleBone Blue Fuente: (BeagleBoard, 2018)

BeagleBone Blue es una computadora todo en uno basada en Linux para robótica, que integra en una sola placa pequeña (3.5" x 2.15") el microprocesador Octavo OSD3358. Esta tarjeta cuenta con múltiples sensores integrados, los cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla.(BeagleBoard, 2018)

Tabla 9.

Especificaciones BeagleBone Blue

Especificaciones	Descripción
Procesador	AM3358 ARM Cortex-A8
Velocidad máxima del procesador	1GHz
Co procesadores	2x200-MHz PRUs, ARM Cortex-M3, SGX PowerVR
Memoria	512MB DDR3 (800MHz x 16), 4GB on-board storage using eMMC, ranura microSD
Puertos digitales	24 (3.3V)
Puertos análogos	4 (1.8V)
USB	USB 2.0 480Mbps Host/Client Port, USB 2.0 Host Port
Conexión	2.4GHz WiFi, Bluetooth, BLE
Video	SPI displays
Audio	add-ons, Bluetooth
Sensores integrados	IMU de 10 grados de libertad (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro, termómetro), barómetro / termómetro

Fuente: (BeagleBoard, 2019d)

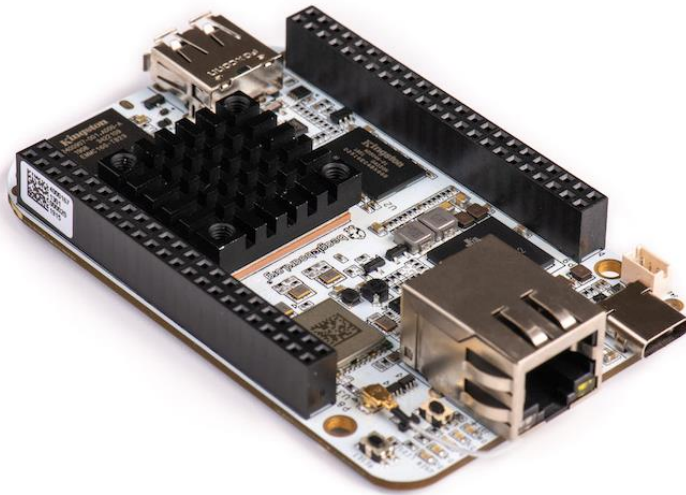
BeagleBone AI.

Figura 30. BeagleBone AI

Fuente: (BeagleBoard, 2019b)

BeagleBone AI está basada en el enfoque probado de Linux de código abierto; esta tarjeta llena el vacío entre los pequeños SBC y las computadoras industriales más potentes. Basado en el AM5729 de Texas Instruments, los desarrolladores tienen acceso al poderoso SoC con la facilidad del encabezado BeagleBone® Black y la compatibilidad mecánica. (BeagleBoard, 2019b)

Tabla 10.

Especificaciones BeagleBone AI

Especificaciones	Descripción
Procesador	AM5729 2x ARM Cortex-A15
Velocidad máxima del procesador	1.5GHz
Co procesadores	4x200-MHz PRUs, 2x ARM Cortex-M4, 2x SGX PowerVR, 2x HD video
Memoria	1GB DDR3 (2x 512Mx16, dual-channel), 16GB on-board storage using eMMC, ranura microSD
Puertos digitales	24 (3.3V)
Puertos análogos	4 (1.8V)
USB	USB 3.0 5Gbps Host/Client Port, USB 2.0 Host Port
Conexión	Gigabit Ethernet, 2.4/5GHz WiFi, Bluetooth, BLE
Video	microHDMI, cape add-ons
Audio	microHDMI, Bluetooth, cape add-ons
Sensores integrados	temperatura en la matriz

Fuente: (BeagleBoard, 2019d)

Software

Xamarin.

Xamarin es una plataforma de código abierto para compilar aplicaciones modernas y con mejor rendimiento para iOS, Android y Windows con .NET. Xamarin es una capa de abstracción que administra la comunicación de código compartido con el código de plataforma subyacente.

Xamarin se ejecuta en un entorno administrado que proporciona ventajas como la asignación de memoria y la recolección de elementos no utilizados.

Xamarin permite a los desarrolladores compartir un promedio del 80 % de la aplicación entre plataformas. Este patrón permite a los desarrolladores escribir toda la lógica de negocios en un solo lenguaje (o reutilizar el código de aplicación existente), pero conseguir un rendimiento y una apariencia nativos en cada plataforma.

Las aplicaciones de Xamarin se pueden escribir en PC o Mac, y compilar en paquetes de aplicación nativos, como un archivo .apk en Android o .ipa en iOS

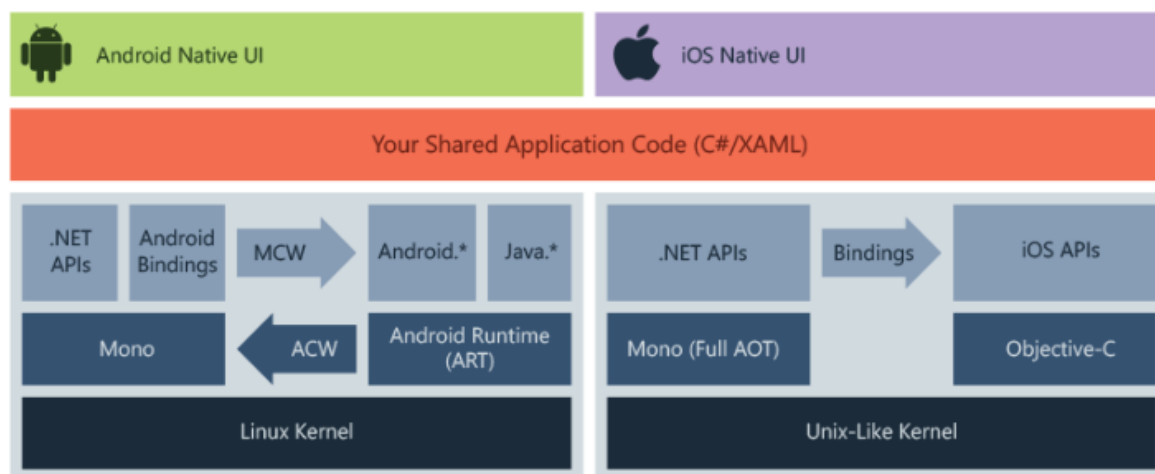


Figura 31. Arquitectura general de una aplicación Xamarin multiplataforma

Fuente:(Microsoft, 2020)

Xamarin permite crear una interfaz de usuario nativa en cada plataforma y escribir lógica de negocios en C# que se comparte entre plataformas. En la mayoría de los casos, con Xamarin se puede compartir el 80 % del código de la aplicación.(Microsoft, 2020)

Arduino IDE.

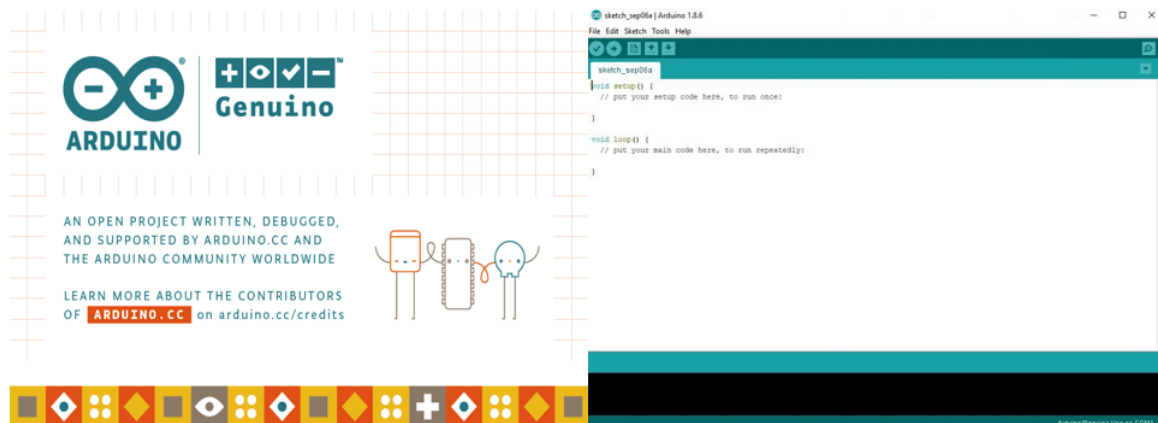


Figura 32. IDE Arduino

Fuente: (Arduino, 2020a)

El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino es una aplicación multiplataforma (para Windows, macOS, Linux) de código abierto (open source) que está escrita en el lenguaje de programación Java. Se utiliza para escribir y cargar programas en placas compatibles con Arduino, este entorno de programación está basado en el entorno de processing y un lenguaje de programación que admite C y C++ (Arduino, 2020a).

Sensores

Mioeléctricos muscle sensor V3.



Figura 33. Muscle sensor v3

Fuente: (Advancer Technologies, 2013)

Muscle sensor V3 es un sensor fabricado por la compañía Advancer technologies, este dispositivo es capaz de medir, filtrar y rectificar la actividad eléctrica en los músculos, transformando ésta en una señal de salida en voltios, cuya intensidad depende de la cantidad de actividad en el músculo seleccionado y la ganancia configurada. Este producto actualmente se encuentra descontinuado (Advancer Technologies, 2013).

Tabla 11.

Especificaciones muscle sensor V3

Especificaciones	Descripción
Alimentación	min +- 3.5V a +-18V
Dimensiones	2.54cm (Ancho) 2.54cm (Largo)
Precio	\$28.81

Fuente: (Advancer Technologies, 2013)

Mioeléctricos myoware muscle sensor AT-04-001.



Figura 34. Myoware muscle sensor Fuente: (Technologies, 2015)

Myoware muscle sensor es un sensor fabricado por la compañía Advancer technologies, este dispositivo es capaz de medir, filtrar y rectificar la actividad eléctrica en los músculos, transformando ésta en una señal de salida en voltios, cuya intensidad depende de la cantidad de actividad en el músculo seleccionado y la ganancia configurada. Este es el sucesor del Muscle sensor V3, cuenta con nuevas características como en el caso de la alimentación solo requiere de 3.3V a 5V, no necesita una fuente de voltaje simétrica como su predecesor, cuenta también con tres conectores electrodos en su tarjeta, Led indicador, un interruptor de apagado y cuenta con una segunda señal de salida RAW EMG, la cual es la señal original sin ser rectificado (Technologies, 2015).

Tabla 12.

Especificaciones Myoware muscle sensor

Especificaciones	Descripción
Alimentación	Min 3.1V a 6.3V
Dimensiones	2.07cm (Ancho) 5.23cm (Largo)
Precio	\$37.99

Fuente: (Technologies, 2015)

Tabla 13.

Comparación de sensores muscle sensor V3 y Myoware muscle sensor

Sensor	Muscle Sensor V3	Myoware muscle sensor
Alimentación	min +- 3.5V a +-18V	Min 3.1V a 6.3V
Dimensiones	2.54cm (Ancho) 2.54cm (Largo)	2.07cm (Ancho) 5.23cm (Largo)
Precio	\$28.81	\$37.99
Conector de electrodos integrados	NO (cuenta con un cable que se conecta al dispositivo)	SI
Salida RAW EMG	NO	SI
Protector de polaridad en los pines de poder	NO	SI
Led indicador	NO	SI
Interruptor de encendido	NO	SI

*Fuente: Propia***Actuadores****PQ12-R micro linear servo.***Figura 35. Servo motor**Fuente: (Actuonix, 2020b)*

Los servos micro lineales de la serie PQ12-R funcionan como reemplazo directo de los servos rotativos estándares. Utilizan el mismo conector estándar de 3 cables, tierra, alimentación y control. Independientemente de cómo maneje sus servos, ya sea con un receptor RC, una placa Arduino o un microcontrolador VEX, el servo PQ12-R funcionará en lugar de un servo regular, pero con el beneficio adicional de proporcionar movimiento lineal (Actuonix, 2020b).

Servomotor MG996.



Figura 36. Servomotor MG996

Fuente: (Components, 2019)

Es un servomotor de engranaje de metal, con un torque de detención máxima de 11 Kg/cm, al igual que otros servomotores este gira de 0 a 180 grados según el ciclo de trabajo de la onda PWM suministrada a su pin de señal, a su vez este cuenta con 3 cables de colores marrón, rojo y naranja, siendo tierra o negativo, alimentación o positivo y señal respectivamente (Components, 2019). A continuación, algunas características:

- Voltaje de funcionamiento: + 5V
- Corriente: 2.5A (6V)
- Torque de detención: 9,4 kg / cm (a 4,8 V)

- Torque de detención máximo: 11 kg / cm (6 V)
- Velocidad de funcionamiento: 0,17 s / 60 °
- Tipo de engranaje: Metal
- Rotación: 0 ° -180 °

Servo lineal L16-R.



Figura 37. Servo lineal L16-R

Fuente: (Actuonix, 2020a)

Los servos lineales en miniatura L16-R funcionan como un reemplazo directo para los servos rotativos estándares. Usan el mismo conector de 3 cables, conexión a tierra y control, es ideal para aplicaciones donde se necesita una fuerza mayor, pero desea mantener el peso bajo

Está construida con un eje de aluminio anodizado, caja de engranajes de metal y rodamientos de bolas de acero. Están diseñados para una larga duración y un diseño agradable (Actuonix, 2020a).

Tabla 14.

Especificaciones PQ12-R Micro Servo Lineal 100:1, Servo lineales L16-R 63:1, Servomotor MG996

Característica	PQ12-R Micro Servo Lineal 100:1	Servo lineal L16-R 63:1	Servomotor MG996
Alimentación	6VDC	6VDC	4.8V a 7.2V

Medidas (Alto Ancho Largo)	2.15x1.5x3.65	2x1.8x20.79	4.29x1.97x4.07
Largo Máximo	5.65	30.79	
Temperatura	-10°C a 50°C	-10°C a 50°C	0°C a 55°C
Precio	\$ 70.00 (USD)	\$ 70.00 (USD)	\$ 14.00 (USD)

Fuente: Propia

Protocolo bluetooth

Es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN), que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos, mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2.4 GHz (Molina, 2016). Bluetooth fue desarrollado inicialmente en 1994 por L. M. Ericsson, el cual nombró al estándar igual que el rey de Dinamarca Harald Blatand (“Bluetooth”). Posteriormente, la mayoría de las empresas manufactureras de teléfonos móviles y proveedores de tecnología de la época, entre los cuales estaba IBM, Nokia, Intel, Ericsson y Toshiba, crearon the Bluetooth Special Interest Group (SIG), el cual tuvo como objetivo principal inventar una especificación o estándar abierta para conexiones inalámbricas de corto alcance.

Actualmente, El grupo SIG continúa supervisando esta tecnología y, además cuenta con más de 1900 compañías más, desde que fue creado, entre las cuales están grandes empresas como: 3COM, Microsoft, Lucent y Motorola, que también promueven este grupo (Zeadally et al., 2019).

La intención inicial de esta tecnología fue la transmisión de datos entre computadores y dispositivos informáticos inalámbricamente, sin embargo, desde 1998 SIG se ha encargado de satisfacer constantemente las crecientes demandas para la innovación inalámbrica, enviando dispositivos bluetooth y se proyecta que continúe aumentando, como se puede apreciar en el siguiente gráfico (Bluetooth SIG, 2020).

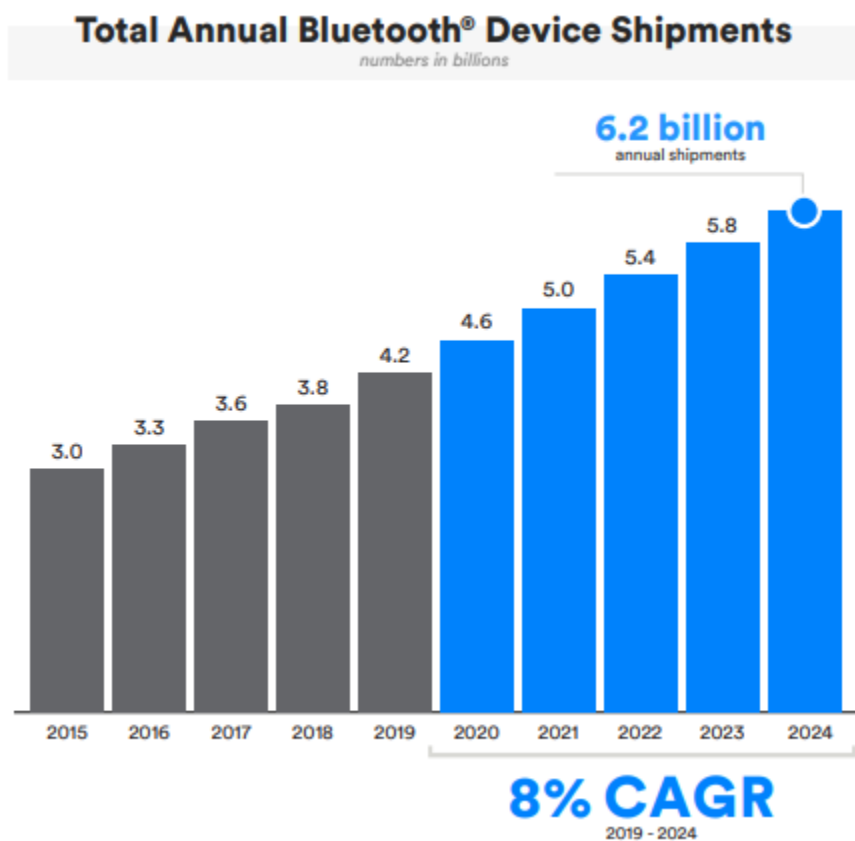


Figura 38. Envíos de dispositivos Bluetooth anuales expresado en miles de millones

Fuente: (Bluetooth SIG, 2020)

Desde su invención en 1994 hasta el año 2019, Bluetooth cuenta con 4 versiones principales: Bluetooth Basic Rate (BR)/Enhanced Data Rate (EDR), Bluetooth Low Energy (BLE) y Bluetooth Mesh. A continuación, se puede apreciar una línea de tiempo de las versiones,

seguido por una tabla que muestra las principales diferencias y características de cada una de estas versiones. (Zeadally et al., 2019).

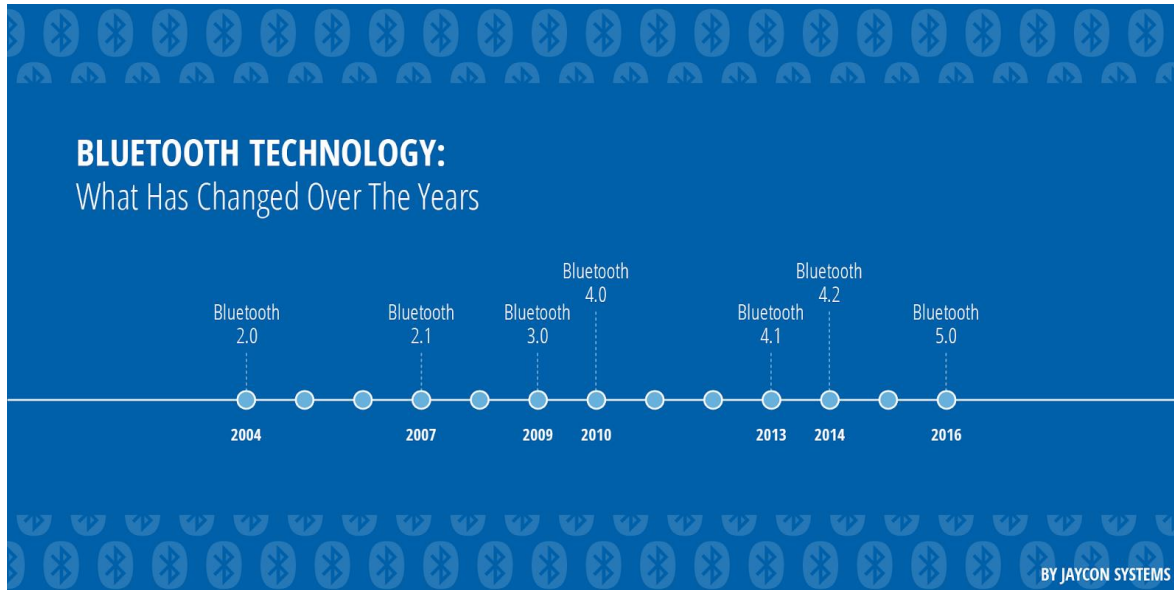


Figura 39. Línea de tiempo de las versiones de Bluetooth

Fuente: (Zeadally et al., 2019)

Tabla 15.

Diferencias entre versiones Bluetooth

Especificaciones Bluetooth	v 1.1	v 2.0	v 2.1	v 3.0	v 4.0	v 4.1	v 4.2	v 5.0
Año	2002	2004	2007	2009	2010	2013	2014	2016
Tasa Básica	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Tasa Básica Mejorada	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Alta velocidad	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
baja potencia	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI

Fuente: (Zeadally et al., 2019)

Bluetooth, al ser una tecnología versátil y multiplataforma, ha desarrollado módulos compatibles con diferentes tecnologías, siendo una de éstas Arduino, con la que cuenta con

alrededor de 20 formas diferentes para lograr la conexión bluetooth, siendo la más popular el uso de los módulos de la serie HC-0X, de los cuales hablaremos a continuación:

Módulo HC – 05.

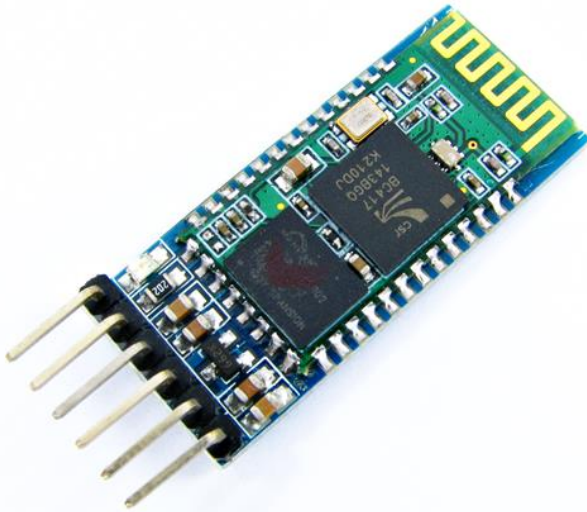


Figura 40. Módulo HC – 05

Fuente: (Guarnizo, 2014)

HC-05 es un módulo Maestro-Eslavo, quiere decir que además de recibir conexiones desde un PC o Tablet, también es capaz de generar conexiones hacia otros dispositivos bluetooth. Esto nos permite, por ejemplo, conectar dos módulos de bluetooth y formar una conexión punto a punto para transmitir datos entre dos microcontroladores o dispositivos(Guarnizo, 2014)

Características

- Compatible con Arduino Sensibilidad Típica: -80dBm.
- Hasta +4 dBm de potencia de transmisión RF.
- Bluetooth V2.0 + modulación EDR 3Mbps.

- Funcionamiento de bajo consumo.
- PIO control.
- Interfaz UART con velocidad de modulación en baudios programable.
- Antena PCB Integrada.

Módulo HC – 06.

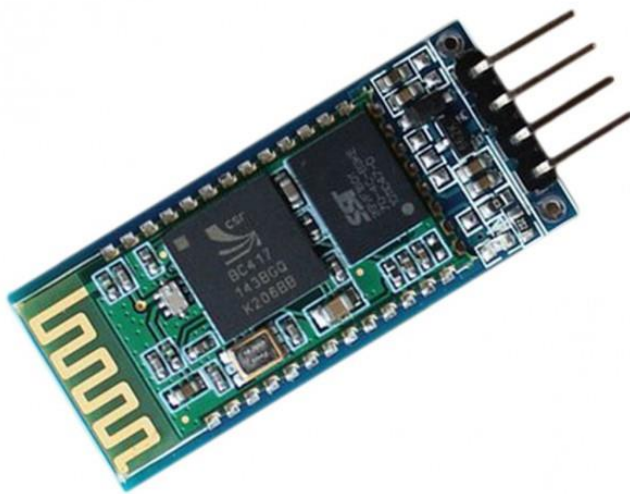


Figura 41. Módulo HC – 06

Fuente: (Components, 2018)

HC-06 es un módulo Bluetooth diseñado para establecer una comunicación inalámbrica de datos de corto alcance entre dos microcontroladores o sistemas. El módulo funciona con el protocolo de comunicación Bluetooth 2.0 y sólo puede actuar como un dispositivo esclavo. Este es el método más barato para la transmisión inalámbrica de datos y más flexible en comparación

con otros métodos e incluso puede transmitir archivos a una velocidad de hasta 2.1Mb / s.

(Components, 2018)

Características

- Protocolo Bluetooth: estándar de protocolo Bluetooth V2.0
- Nivel de potencia: Clase2 (+ 6dBm)
- Banda: 2.40GHz — 2.48GHz, Banda ISM
- Sensibilidad del receptor: -85dBm
- Protocolo USB: USB v1.1 / 2.0
- Modo de modulación: frecuencia de Gauss Shift Keying
- Característica de seguridad: autenticación y encriptación
- Rango de voltaje de funcionamiento: + 3.3V a + 6V
- Rango de temperatura de funcionamiento: -20°C a + 55°C
- Corriente de funcionamiento: 40 mA

Módulo HC – 08.



Figura 42. Módulo HC – 08 Fuente: (Prototyping, 2018)

HC-08 es un módulo Bluetooth 4.0 de baja energía, se puede conectar fácilmente a iOS 5 y Android 4.3 o superior, mediante el uso de una aplicación de terminal en serie. Puede usar la comunicación Bluetooth hasta 80 metros con este módulo Bluetooth BLE. También funciona en una frecuencia de 2.4GHz. El conjunto de chips es CC2540 con 256K Byte de espacio. Puede cambiar el rol y la velocidad de transmisión en serie y admite comandos AT para la configuración.

Es de tamaño muy pequeño, 1.1 x 0.5 pulgadas (26.9 x 13 mm). El grosor de la PCB es de 0.03 pulgadas (0.7 mm). Los agujeros a medio cortar se extienden a lo largo de la tabla, por lo que es muy fácil incrustarlos en su propio proyecto. También tiene pin Tx y Rx 2.54, desde el cual puede hacer una prueba de función rápida. Se incluyen pines macho de 90 grados.

(Prototyping, 2018)

Especificaciones:

- Frecuencia: ISM de 2.4 GHz
- Protocolo: BLE 4,0
- Potencia máxima de transmisión: máx. 4dBm
- Sistema de modulación: GFSK
- Velocidad de transmisión en serie: 1200 a 115200 bps
- Distancia de referencia: 80 metros
- Velocidad: 1 Mbps (máx.)

Impresión 3D



Figura 43. Impresión 3D.

Fuente: (Ortega, 2016).

Una impresora 3D es una máquina capaz de materializar objetos a partir de un archivo digital, es decir, partiendo de un archivo digital (Modelo 3D) se utilizan diferentes procesos aditivos en los que se aplican capas sucesivas de materia para crear un objeto tangible; lo que significa que se pueden traer al mundo nuevos objetos y herramientas que anteriormente no existían.

Modelar es el proceso de creación de una representación matemática de superficies utilizando geometría. El resultado generado se conoce como un modelo 3D; éste se puede representar de dos maneras: en pantalla como una imagen bidimensional, o como objeto físico a través de una impresora 3D (Ortega, 2016).

Metodología

La prótesis mioeléctrica a bajo costo es un proyecto con mucho potencial. No es fácil replicar la totalidad de los movimientos de la mano humana por la cantidad de elementos que intervienen en ésta. Por esta razón se decidió aplicar la metodología incremental en este proyecto, con el objetivo de hacer entregables funcionales de la prótesis mioeléctrica cada vez más complejas y útiles para los usuarios.

La investigación que se utilizó en este proyecto es de tipo aplicada, ya que no fue una investigación que solo se plasmó en teoría, sino que, se llevó a la práctica a través de un prototipo funcional. El enfoque es cuantitativo ya que se contó con unos planteamientos específicos y delimitados; las actividades realizadas son estructuradas, dado que todas fueron necesarias y ordenadas para cumplir el objetivo del proyecto. Otro de los elementos que se utilizó en el enfoque es la lógica, uno de los elementos más importantes en el ámbito de la programación.

El proyecto se inició revisando el estado de la prótesis de miembro superior perteneciente a la empresa 3D Ingeniería BQ, para esto se realizó una reunión con los ingenieros de la empresa, los cuales expusieron su diseño y realizaron una prueba del prototipo. Luego de haber conocido el estado del prototipo se procedió a identificar, desde la perspectiva de la ingeniería electrónica y de sistemas, mejoras para su funcionamiento, analizando y estudiando soluciones presentes en el mercado e ideas propias. Identificadas las mejoras, prosiguió la etapa de implementación de dichas mejoras. Posteriormente, la etapa de evaluación final del sistema electrónico, incluyendo pruebas con el equipo de ingenieros como usuarios hasta alcanzar un resultado satisfactorio y, por último, la realización de la prueba con una persona con amputación de miembro superior.

Evaluación funcionamiento inicial prótesis

El diseño de la prótesis presentado por la empresa 3D Ingeniería BQ cuenta con 2 acciones, mano abierta y cerrada. Para realizar estas acciones se utilizó un sensor mioeléctrico, el cual se encarga de recibir una señal del brazo del usuario y a su vez, enviarle una señal eléctrica al Arduino; dependiendo de la acción que están realizando los servomotores (mano abierta o mano cerrada), realiza la acción contraria.

La empresa hace entrega de los siguientes componentes:

Tabla 16.

<i>Materiales</i>	
Elemento	Cantidad
Sensores mioeléctricos	2
Placa de control	1
Electrodos Reutilizables	8
Electrodos	36
Servomotor	5
Mano protésica	1
Socket mano protésica	1
Batería	1

Fuente: 3D Ingeniería BQ

Adicionalmente, la empresa suministró enlaces web de prótesis mioeléctricas en el mercado actual. El software implementado en el proyecto no se proporcionó para realizar análisis, sólo se proporcionaron códigos en lenguaje Arduino, que contenían elementos de la prótesis como servomotores y sensores mioeléctricos.

A continuación, se puede apreciar un plano electrónico del estado inicial de la prótesis de 3D Ingeniería BQ.

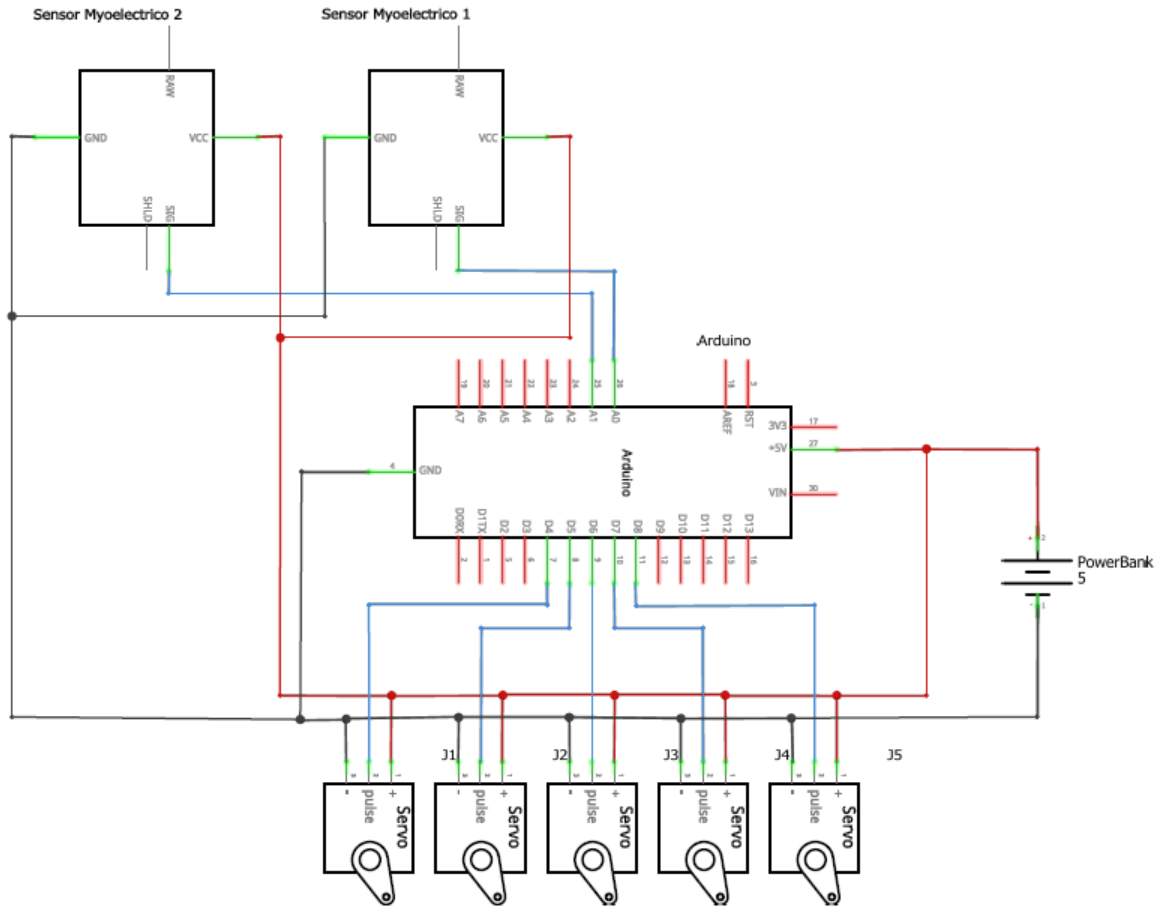


Figura 44. Circuito empresa 3D Ingeniería BQ

Fuente: Propia

Identificación y priorización alternativas de mejora

En esta etapa del proyecto, la empresa 3D Ingeniería BQ tenía ideas de funciones para mejorar el desempeño de la prótesis, con el objetivo de que los usuarios puedan realizar más tareas cotidianas con ésta; estas funciones son:

Tipeo

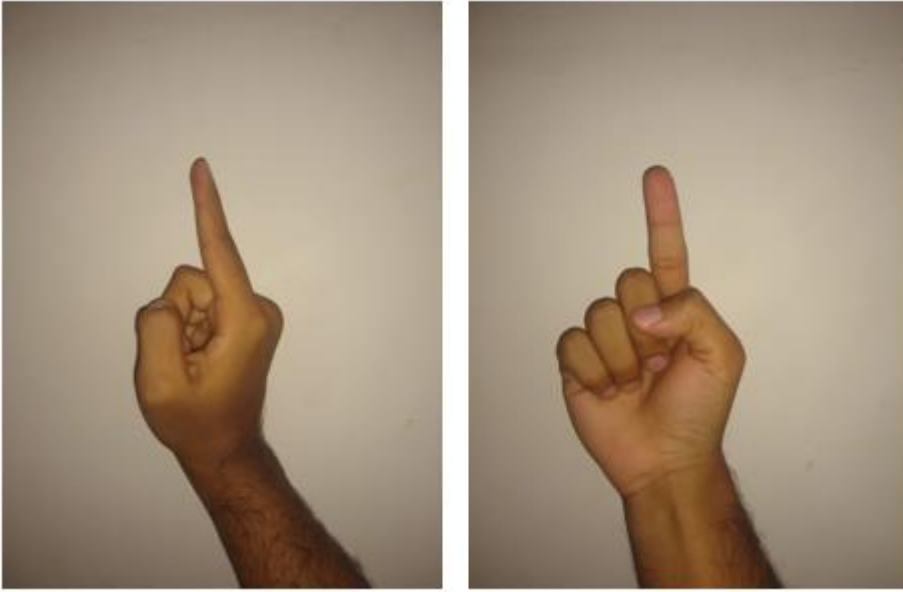


Figura 45. Típeo

Fuente: Propia

Típear es la acción de la escritura en máquinas de escribir o computadores. Esta es una de las acciones más comunes que se realizan en los trabajos y estudios. Como el proyecto está en sus etapas iniciales, se decidió realizar esta acción solamente con el dedo índice y posteriormente mejorar esta función tan importante.

Agarre Fino.



Figura 46. Agarre Fino

Fuente: Propia

El agarre fino es otra de las acciones que más realizamos en nuestro día a día, por la cantidad de objetos pequeños que nos rodean y la importancia de su manipulación como, por ejemplo, lápices, llaves, pinzas, corta uña entre otros.

Al tener más de una función la prótesis, se hace necesario una operación que permita al usuario decidir y cambiar entre éstas dependiendo de su necesidad; dicha operación se llamó cambio de funciones.

Cambio de Funciones

Esta operación se planteó utilizando el otro sensor mioeléctrico a disposición. Dicho sensor recibirá la señal eléctrica de otro músculo del brazo del usuario; al recibir esta señal, el Arduino cambiará de la función actual a la siguiente en un ciclo repetitivo; al llegar a la última función y recibir la señal del sensor, volverá a la primera función.

Conjuntamente con los encargados del proyecto por parte de la empresa, luego de estudiar el funcionamiento de la prótesis y de los materiales suministrados, además de las sugerencias de funciones para mejorar el desempeño de la prótesis, se llegó a la conclusión que el agarre fino no es viable con el diseño actual de la prótesis y el cambio de funciones actual no es óptimo para etapas futuras del proyecto. Actualmente al solo tener 2 funciones, el usuario puede buscar y pasar de una a otra para llegar a la deseada, pero al agregarle más funciones en las siguientes etapas, la experiencia no será tan cómoda. Basado en lo anterior se visualizaron alternativas para el desarrollo del proyecto, dichas alternativas se clasificaron en dos tipos: alternativas electrónicas y alternativas de diseño.

Alternativas electrónicas

Las alternativas electrónicas son aquellas que le dan movilidad a la prótesis mioeléctrica con el diseño actual de ésta, entre estas alternativas destacan el cambio de funciones y los electrodos de tela conductora.

Cambio de funciones.

Realizar el cambio de funciones es de suma importancia para el proyecto, ya que cada vez se agregarán más funciones; la forma que plantea la empresa es útil en estos momentos ya que no son muchas funciones, pero para el futuro con las nuevas funciones que se agregaran al proyecto, resultará engorroso para el usuario encontrar la función que necesite. Basándonos en esto y la necesidad de no elevar los costos de producción del proyecto, se optó por utilizar una tecnología que cada vez es más indispensable y útil para las personas como son los dispositivos móviles; es cada vez más difícil encontrar personas que no cuenten con estos equipos. Los dispositivos móviles hacen parte de nuestra cotidianidad, del usuario depende el uso, en este caso el usuario lo utilizará para decirle al Arduino qué función desea realizar y accionará la función por medio de un solo sensor mioeléctrico.

Electrodos de tela conductora.



Figura 47. Electrodo de tela conductora Fuente: (Advancer Technologies, 2013)

Uno de los principales beneficios del proyecto es su bajo costo, un material que puede dificultar este objetivo son los parches mioeléctricos, los cuales representan un gran gasto a futuro por su costo y capacidad de uso. Los electrodos de tela conductora son una alternativa que presentan los fabricantes de los sensores mioeléctricos, fabricando electrodos reutilizables para detectar la actividad muscular (Advancer Technologies, 2013)

Alternativas de diseño

Las alternativas de diseño son aquellas que requieren de una reestructuración de la prótesis en aspectos como movilidad, componente, entre otros, lo cual requiere de un nuevo diseño e impresión en 3D, entre estas mejoras destaca la oposición del pulgar.

Oposición del pulgar

Actualmente la prótesis cuenta con servomotores en los dedos, los cuales permiten su movimiento, pero no cuenta con la oposición del dedo pulgar, la cual es una de las principales características de la mano humana que la diferencia de la mayoría de los animales. Esta oposición se realiza en la parte inferior del pulgar en la región de la Eminencia Tenar, la cual incluye los siguientes músculos: aductor corto del pulgar, flexor corto del pulgar y el oponente del pulgar.

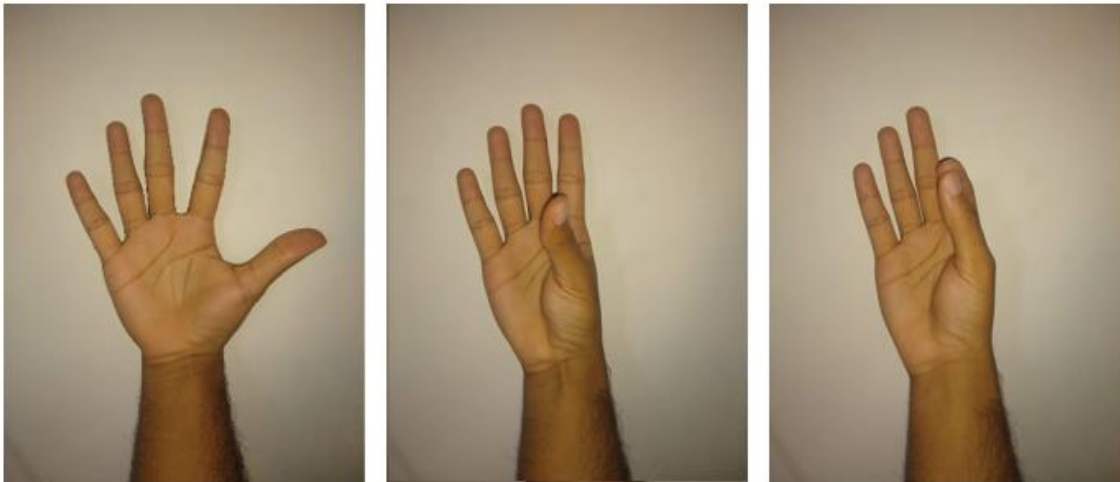


Figura 48. Oposición del Pulgar

Fuente: Propia

Para replicar la oposición del pulgar es necesario una reestructuración del diseño de la prótesis y la inclusión de servomotores que realicen la función de separación y oposición del dedo pulgar.

Mejoras para implementar en la prótesis

Luego de presentar las alternativas de mejora a los encargados del proyecto de la empresa 3D Ingeniería BQ, se llegó a la conclusión que las que se implementarán en el proyecto son: función agarre con las acciones abrir y cerrar mano (no fue suministrado el software con esta función), tipeo (Alternativas de la empresa) y cambio de funciones (Alternativas electrónicas).

Las alternativas de diseño no se implementarán ya que son mejoras que se le deben realizar al prototipo y la empresa las estudiará en futuras versiones.

Implementación de las alternativas de mejora identificadas

Para la realización del proyecto se utilizó como base el paradigma de programación funcional, ya que permite un mejor manejo del código por medio de funciones o subrutinas, las cuales contienen un código para realizar una tarea en específico del programa o proyecto, en este

caso son las acciones que realiza la prótesis. Se optó por este paradigma de programación para hacer el desarrollo más fácil ya que en la siguiente etapa se agregarán nuevas funciones o mejoras en las implementadas. Tener un código con paradigma secuencial implica buscar el lugar correcto donde añadir o corregir, mientras que en el paradigma seleccionado se va directamente a la función correspondiente para realizar la modificación o se crea una nueva, dependiendo de la necesidad del programador.

Para explicar más a detalle, se dividirá la implementación en 3 etapas que son: la programación del Arduino, la conexión bluetooth entre ambos y la programación de la aplicación móvil

Arduino

El Arduino se encarga de darle movimiento a los dedos de la prótesis, recibir la función que el usuario desea utilizar, por medio de Bluetooth; esta función será llamada en el código principal por medio de switch, el cual permite ejecutar un fragmento del código dependiendo de una entrada recibida, la entrada será la acción que desee realizar el usuario.

```
void loop() {
  var= petición()
  switch (var) {
    case 1:
      funcion1();
      break;
    case 2:
      funcion2();
      break;
  }
}

void funcion1(){
  //Codigo para realizar en la función 1
}

void funcion2(){
  //Codigo para realizar en la función 2
}

void petición(){
  // Función que necesita el usuario
}
```

Figura 49. Paradigma de programación funcional y Switch

Fuente: Propia

Se establecerá una función predeterminada (agarre) que será la que se ejecute cuando se active la prótesis; se puede hacer esta función sin utilizar la aplicación móvil, pero no el cambio de funciones; como se aprecia en el siguiente diagrama de flujos

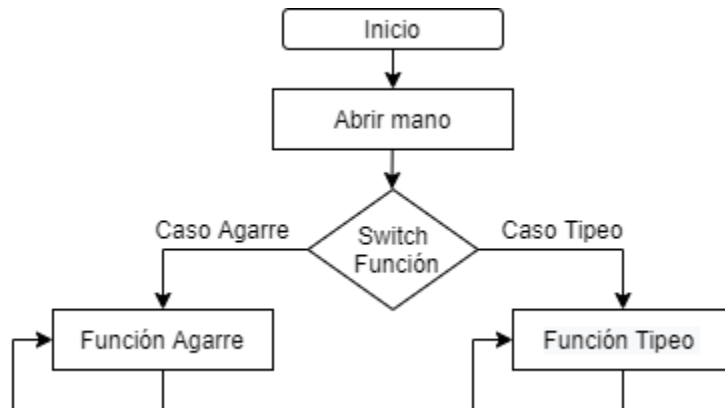


Figura 50. Código Arduino sin App

Fuente: propia

Al integrar la aplicación móvil, lo primero es realizar la conexión y el proceso de configuración para establecer los comandos de comunicación entre ambos dispositivos. Ya integrada la aplicación móvil, esperamos la señal que nos enviará por medio de bluetooth, al recibirla el Arduino la analiza y ejecuta el cambio de función, en caso de que se haya establecido comunicación entre ambos dispositivos.

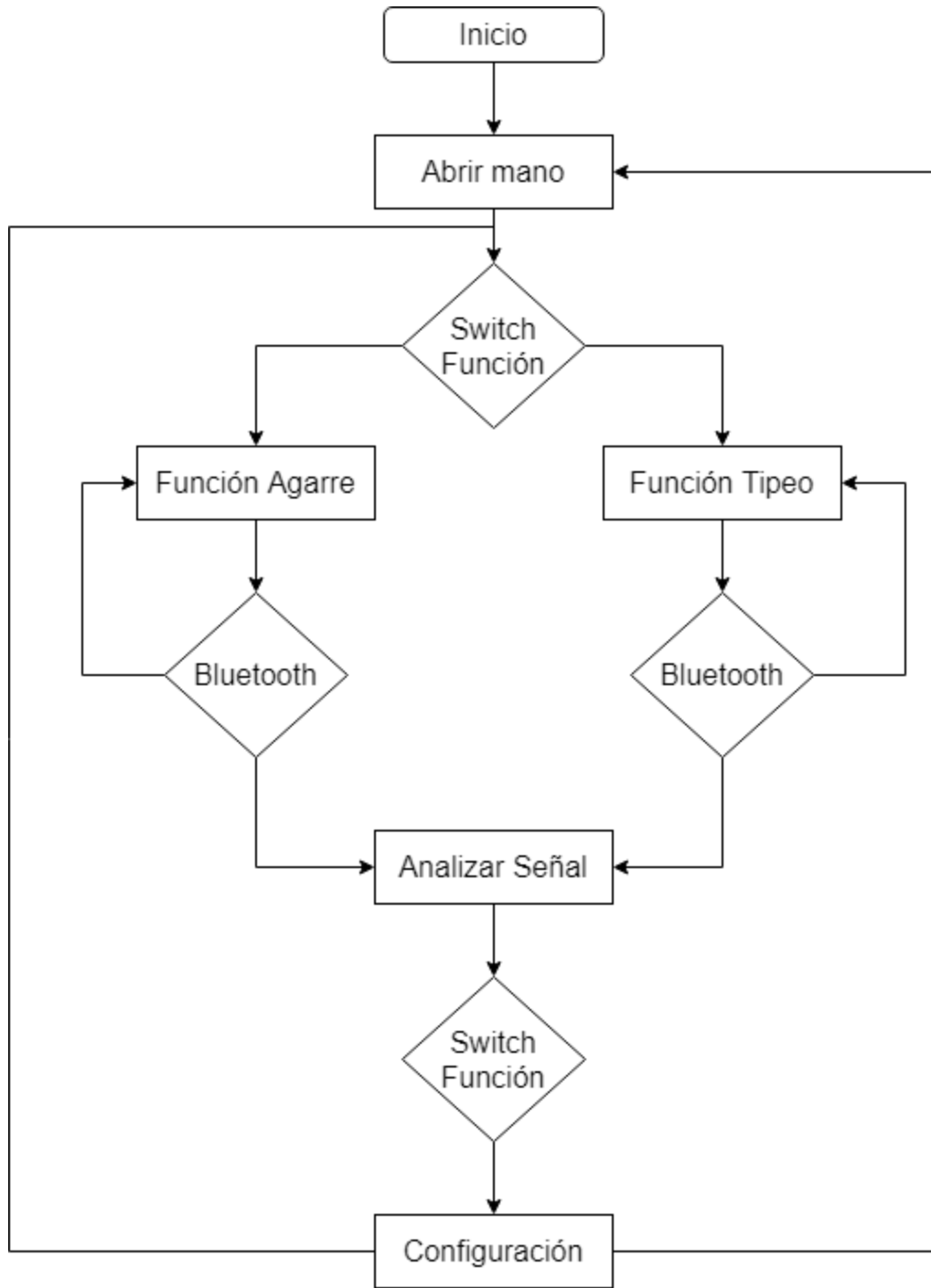


Figura 51. Código Arduino con App

Fuente: Propia

Bluetooth

El Arduino necesita un módulo de Bluetooth, para establecer la comunicación entre éste y la aplicación móvil, el cual cuenta con 6 pines, de los cuales utilizaremos cuatro: Vcc y GND para la alimentación y TXD y RXD para la transmisión y recepción de datos, dichos pines se conectarán a 2 pines digitales del Arduino que realizarán la función de TX y RX.

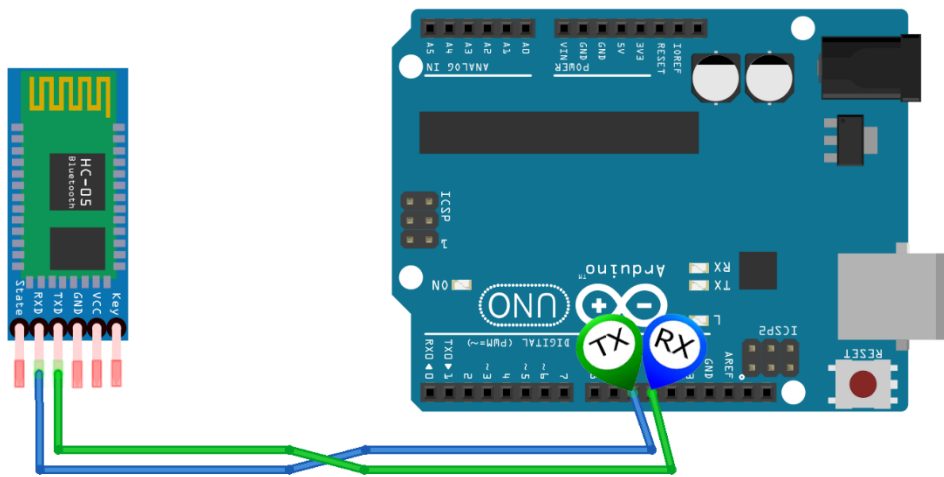


Figura 52. Pines de conexión Arduino y modulo Bluetooth

Fuente: Propia

Tabla 17.

Conexiones Bluetooth

Arduino	Modulo Bluetooth
Vcc	Vcc
GND	GND
TXD	RD
RXD	TD

Fuente Propia

Las conexiones de los pines de comunicación entre el módulo bluetooth y Arduino son inversas, debido a que cada uno es un canal de comunicación. La conexión de TXD a RD es el canal donde el módulo bluetooth le transmite la información al Arduino y la conexión TD a RXD es el canal donde el Arduino le transmite información al módulo Bluetooth.

El módulo Bluetooth cuenta con dos modos: comunicación y configuraciones. El primero es donde se conecta con otros dispositivos y realiza la transferencia de datos; mientras que en el segundo podemos visualizar y cambiar información del módulo como el nombre, contraseña, rol, entre otros. Esta configuración se realiza por medio de comandos AT.

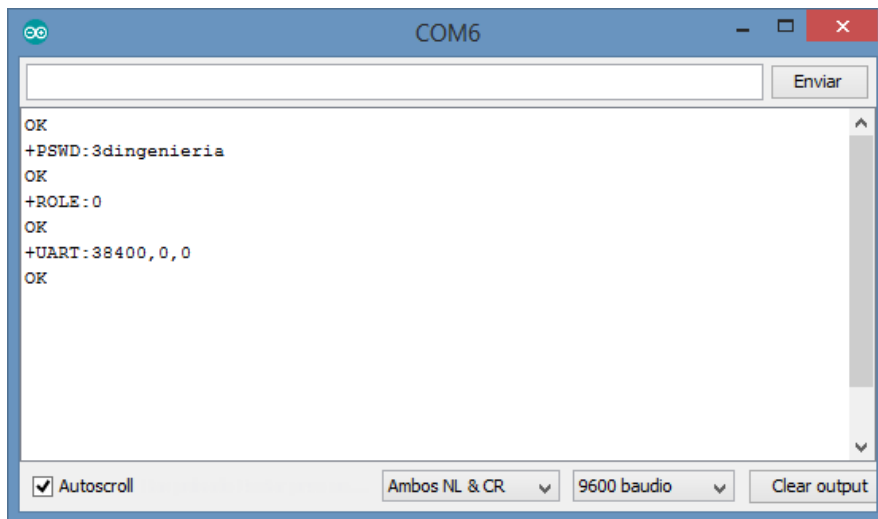


Figura 53. Monitor Serial Arduino configuración modulo Bluetooth

Fuente: Propia

El Arduino puede tomar dos roles: maestro o esclavo. El rol maestro permite buscar y conectar con otros dispositivos con bluetooth, mientras que el rol esclavo se hace visible para que otro dispositivo con bluetooth lo reconozca y se conecte. Cabe resaltar que esto no afecta en nada la transmisión y recepción de datos, ambos dispositivos pueden enviar y recibir datos sin importar el rol que ocupe.

Los dispositivos móviles por su parte, ya cuentan con la tecnología de bluetooth incorporada, así que no es necesario preocuparse por sus conexiones internas, lo que nos incumbe sólo es el tema de la conexión con otros dispositivos que dispongan de esta tecnología, para lo cual es importante la dirección Mac del otro dispositivo y un UUID (Universally unique identifier) que será el identificador único del socket de comunicación entre dispositivos, luego de

eso se establece la conexión y para la transmisión de información es necesario transformarla en byte.

Aplicación móvil

La aplicación móvil será la interfaz de comunicación entre el usuario y el controlador Arduino por medio Bluetooth; se optó por esta tecnología sobre otra como wifi, por la comodidad del usuario ya que, al conectar el móvil con el Arduino por medio de wifi, se crea una red LAN (Red de área local) la cual impide la conexión de ambos dispositivos al internet.

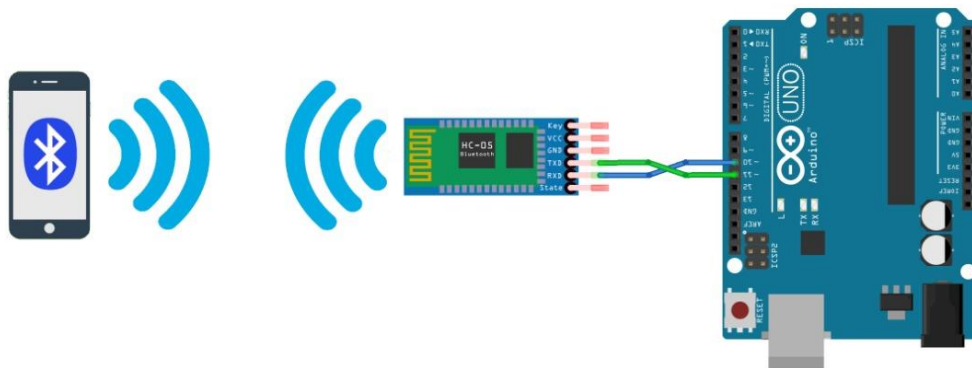


Figura 54. Conexión Arduino con App Móvil

Fuente: Propia

Para la aplicación móvil, lo primero es realizar la conexión y el proceso de configuración de ésta. Para la visualización y el cambio de funciones se optó por realizar dos interfaces que se intercambian dependiendo de la función que esté ejecutando el Arduino; en la interfaz estará la opción de cambiar la función, cuando se detecta el cambio se enviará la información al Arduino y cambiará a la otra interfaz.

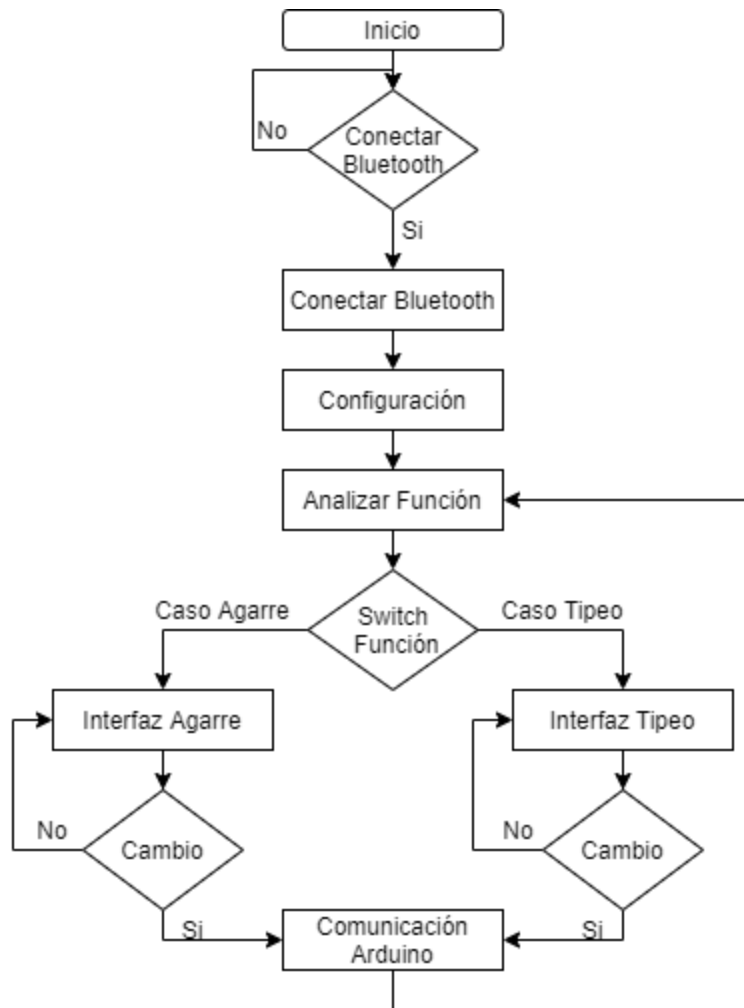


Figura 55. Diagrama de flujo APP

Fuente: Propia

Evaluación final del sistema electrónico

La evaluación final del sistema electrónico consta de tres partes, en la primera revisaremos las conexiones, en la segunda, las funciones implementadas y en la tercera, las pruebas realizadas con una persona sin amputación y con una persona con amputación de miembro superior.

Conexiones

Las conexiones constan de dos partes, la primera, el diagrama de la integración entre el Arduino y los dispositivos electrónicos que conforman el proyecto y la segunda, la comunicación entre la aplicación móvil y el Arduino.

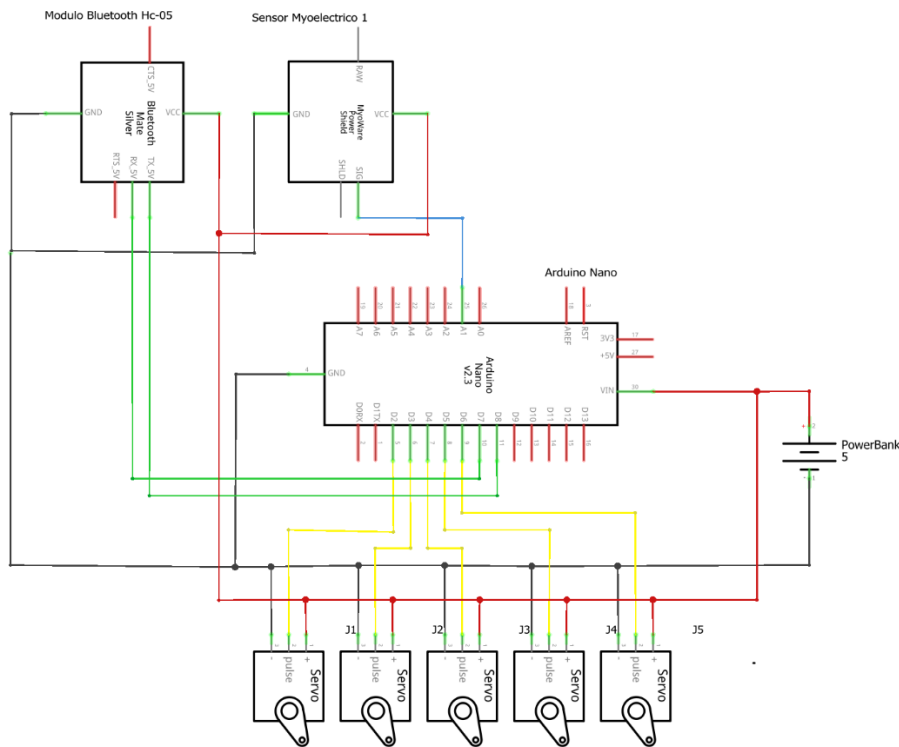


Figura 56. Circuito actual prótesis mioeléctrica

Fuente: propia

A nivel físico no fueron significativas las mejoras en esta etapa del proyecto, ya que los únicos cambios fueron el cableado y, la sustitución del sensor mioeléctrico por el módulo bluetooth que permitió un gran cambio a nivel estructural del proyecto.

Gracias a la integración del módulo bluetooth se puede establecer la comunicación entre la aplicación móvil y el Arduino.



Figura 57. Vista Función Agarre

Fuente: propia

Al pulsar la imagen en la vista de Agarre, la aplicación nos redirige a la vista Tipeo y le comunica al Arduino que debe cambiar a esa función; lo mismo ocurre cuando estamos en la vista de Tipeo y pulsamos la imagen, nos redirige a la vista de Agarre y le comunica al Arduino que cambie a esa función. Al pulsar el botón Pulso, la mano se abrirá o cerrará realizando la acción contraria a la que se encuentre, como si se tratara de una señal mioeléctrica; este botón solo se encuentra en la vista de Agarre ya que la función de Tipeo no la necesita.



Figura 58. Vista Función Típeo

Fuente: Propia

Funciones implementadas

Las funciones que se implementaron en esta etapa del proyecto fueron Agarre y Típeo



Figura 59. Agarre

Fuente: Propia

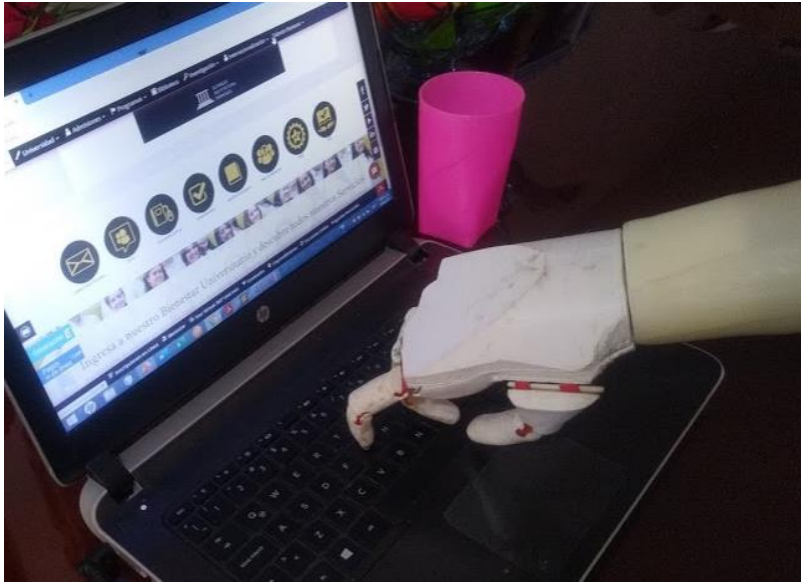


Figura 60. Típeo

Fuente: Propia

Prueba de usuario

Las señales mioeléctricas se obtienen por la diferencia de potencial generada por la contracción de los músculos, estas señales son captadas por electrodos ubicados en la piel.

Las figuras muestran las señales con y sin contracción de un músculo, siendo los picos altos los que representen la contracción.

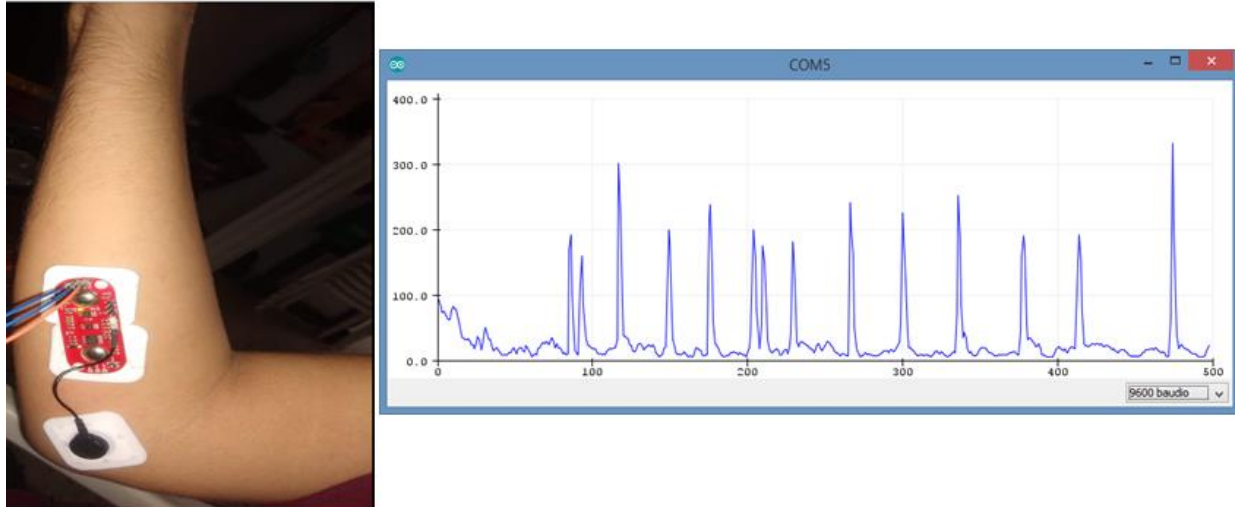


Figura 61. Señales mioeléctricas persona sin amputación de miembro superior

Fuente: propia

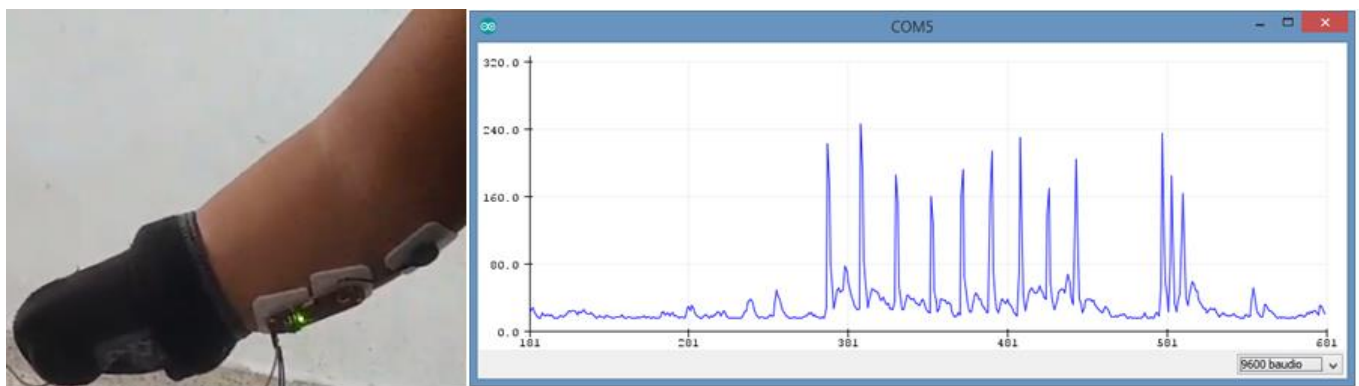


Figura 62. Señales mioeléctricas persona con amputación de miembro superior

Fuente: propia

Se realiza el estudio de las señales mioeléctricas para determinar el valor mínimo y máximo en el cual el músculo del usuario está contraído. El rango de contracción del músculo del usuario se utiliza como rango de operación para la activación de una acción de la prótesis. Al estar en función de agarre el Arduino y recibir un valor del sensor dentro del rango de contracción, se cambia la acción que se está ejecutando.

Al comparar las figuras, se observa la diferencia entre los rangos de las señales mioeléctricas de personas con y sin amputación de miembro superior, en ambos casos se mide la

contracción en el mismo músculo y se puede observar que en la persona con amputación la señal mioeléctrica es más débil.

Las señales pueden cambiar dependiendo de la ganancia del amplificador del dispositivo mioeléctrico. Para este proyecto lo más importante es identificar el rango de contracción del músculo del usuario donde se detecta la señal mioeléctrica, ya que con ésta se abrirá o cerrará la mano en la función de Agarre.

Conclusiones

Al abordar la investigación sobre el diseño y desarrollo de un sistema electrónico para la realización de funciones básicas de la mano humana en una prótesis mioeléctrica de bajo costo de miembro superior, son diversos los enfoques que se tuvieron en cuenta, si bien es cierto que nuestro principal enfoque como ingenieros debe ser la parte tecnológica, también se debe tener en cuenta el propósito fundamental de la ingeniería, cual es mejorar procesos con el objetivo de brindar una mejor calidad de vida a las personas, es por esto que en este proyecto se abordaron diferentes temáticas que se encuentran directamente relacionados con la problemática principal.

Desde una perspectiva tecnológica la prótesis mioeléctrica a bajo costo es un proyecto con mucho potencial; no es fácil replicar la totalidad de los movimientos de la mano humana por la cantidad de elementos que intervienen en ésta; por esta razón aplicamos la metodología incremental en este proyecto, con el objetivo de hacer entregables funcionales de la prótesis mioeléctrica cada vez más complejas y útiles para los usuarios. Se cumplieron los objetivos propuestos en este proyecto, empezando por la revisión del estado de la prótesis en la etapa que la recibimos, presentando propuesta de mejoras a la empresa 3D Ingeniería BQ, identificando las mejoras factibles de realizar en esta etapa y proyectando otras mejoras para futuras versiones. Se implementaron 3 mejoras, el cambio de funciones desde una aplicación móvil en lugar de un sensor como lo tenía planteado la empresa, también se implementaron las funciones tipeo y agarre.

Desde una perspectiva social se pudo apreciar gracias a las estadísticas brindadas por las entidades gubernamentales, que existe un gran número de personas en condición de discapacidad en el país (aproximadamente el 3% de la población según el Ministerio de Protección Social a fecha de corte de marzo de 2020); de esta cifra se pudo constatar de igual forma que un 19,6% de

estas personas poseen limitaciones al momento de llevar, mover, utilizar objetos con las manos; de acuerdo con lo anterior se puede concluir que en Colombia existe una gran población que se vería directamente beneficiada con este prototipo.

Desde una perspectiva económica se pudo apreciar que las prótesis mioeléctricas en el mercado tienen un valor bastante elevado, este varía de acuerdo con la complejidad y calidad, esto hace que sean poco asequibles. Debemos destacar que en la actualidad existen nuevas herramientas, plataformas y tecnologías que permiten reducir considerablemente el costo de la prótesis. El prototipo fue diseñado y creado utilizando la tecnología 3D en la etapa predecesora. Para la implementación de las mejoras a esta prótesis se utilizaron los softwares de Xamarin y Arduino, esta tecnología ayuda a bajar los costos del proyecto, ya que no se requiere comprar licencia para su uso y distribución.

Referencia

Actuonix. (2020a). *L16-R Hobby Linear Actuator For RC*. <https://www.actuonix.com/L16-R-Miniature-Linear-Servo-For-RC-p/l16-r.htm>

Actuonix. (2020b). *PQ12-R Micro Linear Servo | Actuonix*.

<https://www.actuonix.com/Actuonix-PQ12-R-micro-linear-servos-for-RC-p/pq12-r.htm>

Advancer Technologies. (2013). *Conductive Fabric Electrodes*.

<http://www.advancertechnologies.com/2013/03/diy-conductive-fabric-electrodes.html>

Arduino. (2020a). *Arduino - FAQ*. <https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ#toc11>

Arduino. (2020b). *Arduino Mega 2560 Rev3 | Arduino Official Store*.

<https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

Arduino. (2020c). *Arduino Nano | Arduino Official Store*. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>

Arduino. (2020d). *Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store*.

<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

BeagleBoard. (2018). *BeagleBoard.org - blue*. <https://beagleboard.org/blue>

BeagleBoard. (2019a). *BeagleBoard.org - about*. <https://beagleboard.org/about>

BeagleBoard. (2019b). *BeagleBoard.org - AI*. <https://beagleboard.org/ai>

BeagleBoard. (2019c). *BeagleBoard.org - black*. <https://beagleboard.org/black>

BeagleBoard. (2019d). *BeagleBoard.org - boards*. <https://beagleboard.org/boards>

Bermeo Varon, L., Bravo, A., Perez, V., Arcos, E., Quiguanas, D., & Villarejo, J. (2019).

Protocolo para la adquisicion de senales mioelectricas de los musculos inervados por los nervios ulnar, medial y radial para ortesis de mano. 49.

Bluetooth SIG. (2020). *Market Update 2020 I*. 1–37.

Brito, J. L., Quinde, M. X., Cusco, D., & Calle, J. I. (2013). *Estudio del estado del arte de las prótesis de mano.*

Casañas, J. (2014). *5.7 Traumatismos en extremidades superiores: Lesiones, enfermedades y telemedicina en vela extrema.* <https://learn.canvas.net/courses/516/pages/5-dot-7-traumatismos-en-extremidades-superiores>

Components. (2018). *HC 06 Bluetooth module pinout, features & datasheet.*

<https://components101.com/wireless/hc-06-bluetooth-module-pinout-datasheet>

Components. (2019, April 3). *MG996R Servo Motor Datasheet, Wiring Diagram & Features.*

<https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor-datasheet>

da Silva, B. B., Porsani, R. N., Hellmeister, L. A. V., Medola, F. O., & Paschoarelli, L. C.

(2020). Design and development of a myoelectric upper limb prosthesis with 3D printing: A low-cost alternative. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 975, 318–327.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_30

DANE. (2010). *Discapacidad.* <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/discapacidad>

Guarnizo, J. (2014). *TARJETA HC-05 ARDUINO.*

Gustavo, L., & Segal, A. G. (2019). *PROPIEDADES BIOMECÁNICAS DEL MÚSCULO ESQUELÉTICO EVALUADAS MEDIANTE ELASTOGRAFÍA POR ONDAS DE SUPERFICIE.*

Loaiza, J. L. (2012). *Diseño y simulación de un prototipo de prótesis de mano bioinspirada con cinco grados de libertad.* 187.

Microsoft. (2020). *¿Qué es Xamarin? - Xamarin | Microsoft Docs.*

<https://docs.microsoft.com/es-es/xamarin/get-started/what-is-xamarin>

MINSALUD. (2018). *Observatorio Nacional de Discapacidad*.

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/PS/boletin-10-discapacidad.pdf>

MINSALUD. (2020). *Observatorio Discapacidad*.

<http://rsvr2.sispro.gov.co/ObservatorioDiscapacidad/>

Molina, I. (2016). *Bluetooth en Arduino | Aprendiendo Arduino*.

<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/13/bluetooth-en-arduino/>

Nunoa, S. I. I. U., Andres, S., Avasola, R., Ramos, A. S., Rivera, D., Segura, K., Thraves, E.,

Con, L. E. A., Las, A., Para, C., Cambio, D. O., Zakeri, F., Hirobe, T., Noghabi, K. A.,

Kašuba, V., Rozgaj, R., Jazbec, A., Castro, A., Martínez, A., ... Poropat, M. . (2010).

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PROTESIS ROBOTICA DE MANO

FUNCIONAL ADAPTADA A VARIOS AGARRES. *Arhiv Za Higijenu Rada i*

Toksikologiju, 60(4), 982–992. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqq062>

OMS. (2011). *OMS | Informe mundial sobre la discapacidad*. WHO; World Health

Organization.

OMS. (2016). OMS | Discapacidades. *WHO*.

Ortega, A. J. (2016). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*.

<https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=9XmbDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq>

[=Fabricación+digital:+Introducción+al+modelado+e+impresión+3D.+Ministerio+de+educa](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=9XmbDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq)

[ion+cultura+y+deporte&ots=7d3D0dIV5q&sig=xWmfN5K83hGcT1DhcwGEsZqbdWA](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=9XmbDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq)

Össur. (2020). *Life Without Limitations*. <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb->

[ultra](https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-)

Ottobock. (2013). *Prótesis de Mano Michelangelo*.

<https://www.ottobock.com.mx/prosthetics/upper-limb/solution-overview/axon-bus-prosthetic-system-with-michelangelo-hand/>

Ottobock. (2014). *Mano bebionic*. <https://www.ottobock.es/protesica/miembro-superior/sistemas-de-brazo-y-mano/bebionic/>

Palacios Andrés, V., Cruz David, L., Luna Francesco José, G., & Villalba Luz Angelica, G.

(2019). Diseño y Construcción de una Prótesis de Mano Controlada por Medio de un Sensor Mioeléctrico. In *cathi.uacj.mx* (Vol. 28). <http://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/7988>

Prototyping, S. (2018). *HC-08 Serial Bluetooth Module CC2540 (BLE 4.0) | Smart Prototyping*.

<https://www.smart-prototyping.com/HC-08-4-0-BLE-Serial-Bluetooth-Module-CC2540>

Raspberry. (2012). *¿Que es Raspberry Pi? - Raspberry Pi*. <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>

Raspberry. (2018a). *Raspberry Pi 3 Model A+*. www.raspberrypi.org

Raspberry. (2018b). *Raspberry Pi 3 Model B+*. www.raspberrypi.org/products/raspberry

Raspberry. (2020). *Raspberry Pi 4 Computer Model B*. www.raspberrypi.org

RLCPD. (2013). *Registro para la Localización y Caracterización de Personas con Discapacidad*.

https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/Paginas/DisCapacidad_RLCPD.aspx

RLCPD. (2020). *Mapa dinámico*.

<http://ondiscapacidad.minsalud.gov.co/indicadores/Paginas/Mapa-dinamico.aspx>

ROMERO, I. G. (2018). *Qué es la discapacidad. Concepto y evolución histórica y cultural*.

<https://fundacionadecco.org/blog/blog/que-es-la-discapacidad-evolucion-historica/>

Technologies, A. (2015). *Myoware datasheet*. 1–8.

https://github.com/AdvancerTechnologies/MyoWare_MuscleSensor/raw/master/Documents

/AT-04-001.pdf

Zeadally, S., Siddiqui, F., & Baig, Z. (2019). 25 Years of Bluetooth Technology. *Future Internet*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/fi11090194>