



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

Evaluación de un prototipo de fisioterapia asistida para el miembro superior de infantes con hemiplejía izquierda, utilizando un entorno de realidad virtual y la teleoperación de un brazo robótico en la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba – Ecuador

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

Autor:

Mariño Guerrón Byron Andrés

Tutor:

Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva

Riobamba, Ecuador. 2024

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Byron Andrés Mariño Guerrón, con cédula de ciudadanía 1753511490, autor del trabajo de investigación titulado: **Evaluación de un prototipo de fisioterapia asistida para el miembro superior de infantes con hemiplejía izquierda, utilizando un entorno de realidad virtual y la teleoperación de un brazo robótico en la unidad educativa especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba – Ecuador**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, los 31 días de Mayo de 2024.



Byron Andrés Mariño Guerrón

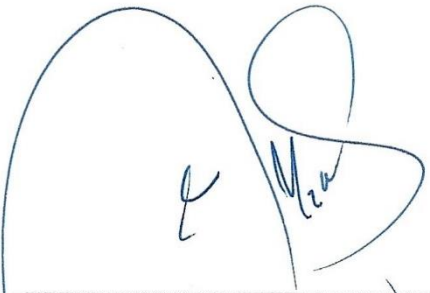
C.I: 1753511490

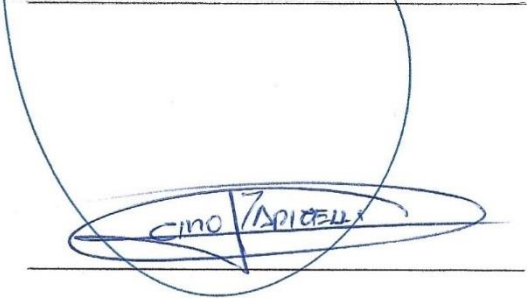
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado del trabajo de investigación: **Evaluación de un prototipo de fisioterapia asistida para el miembro superior de infantes con hemiplejia izquierda, utilizando un entorno de realidad virtual y la teleoperación de un brazo robótico en la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba – Ecuador**, presentado por Byron Andrés Mariño Guerrón, con cédula de identidad número 1753511490, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la APROBACIÓN de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

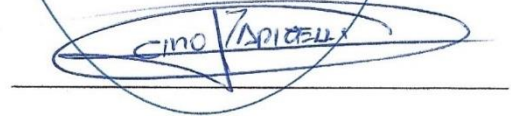
De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 31 días de Mayo de 2024.

Marlon Danilo Basantes Valverde, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





Ciro Diego Radicelli García, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Edgar Giovanni Cuzco Silva, Mgs.
TUTOR



CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Evaluación de un prototipo de fisioterapia asistida para el miembro superior de infantes con hemiplejia izquierda, utilizando un entorno de realidad virtual y la teleoperación de un brazo robótico en la unidad educativa especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba – Ecuador**, presentado por Byron Andrés Mariño Guerrón, con cédula de identidad número 1753511490, bajo la tutoría de Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 31 días de Mayo de 2024.

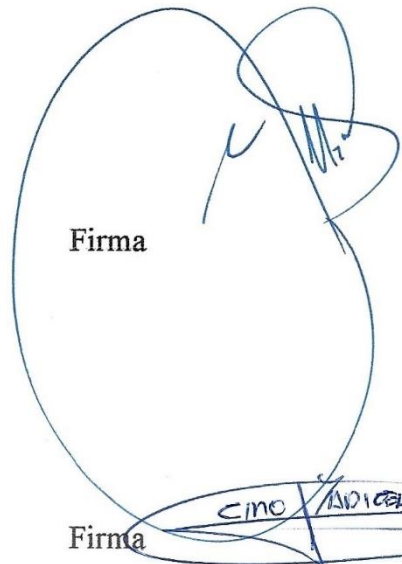
Presidente del Tribunal de Grado
PhD. Daniel Antonio Santillán Haro

Firma



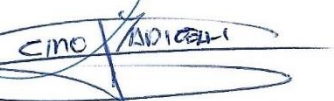
Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Marlon Danilo Basantes Valverde

Firma



Miembro del Tribunal de Grado
Mgs. Ciro Diego Radicelli García

Firma





CERTIFICACIÓN

Que, **MARIÑO GUERRÓN BYRON ANDRÉS** con CC: **1753511490**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE FISIOTERAPIA ASISTIDA PARA EL MIEMBRO SUPERIOR DE INFANTES CON HEMIPLEJIA IZQUIERDA, UTILIZANDO UN ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL Y LA TELEOPERACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO EN LA UNIDAD EDUCATIVA ESPECIALIZADA "CARLOS GARBAY MONTESDEOCA" RIOBAMBA – ECUADOR**", cumple con el 8 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 de Mayo de 2024



EDGAR GIOVANNY
CUZCO SILVA

Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación es dedicado con mucho cariño y amor a mis padres, Bayron Mariño y Melva Guerrón, quienes me han brindado su apoyo incondicional para superar cualquier adversidad, buscando siempre lo mejor para mí, inculcándome que debo perseguir mis sueños y trabajar en lo que más me apasiona.

A toda mi familia y amigos que me han apoyado y ayudado siempre en los mejores y peores momentos de mi vida.

Byron Andrés Mariño Guerrón

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud, perseverancia e inspiración, para que pueda cumplir cada una de las metas que me he propuesto a lo largo mi vida.

A mis padres por confiar en mí y en mis capacidades, dándome la posibilidad de seguir una de las mejores carreras de la Universidad Nacional de Chimborazo.

A todos mis profesores que me han guiado a lo largo de mi formación académica y profesional, especialmente a mi tutor Mgs. Edgar Giovanni Cuzco Silva por enseñarme que las cosas difíciles no existen si uno en verdad busca como llevarlas a cabo y por apoyarme con todos los instrumentos y conocimientos necesarios que fueron de gran ayuda para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la rectora Lorena Coronel, al fisioterapeuta Francisco Vallejo y en especial a los infantes de la “Unidad Educativa Especializada Carlos Garbay Montesdeoca”, quienes con su ayuda hicieron posible este estudio.

Byron Andrés Mariño Guerrón

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE TABLAS..... 10

ÍNDICE DE FIGURAS 11

RESUMEN 13

ABSTRACT 14

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN..... 15

1.1 Introducción..... 15

1.2 Planteamiento del Problema. 16

1.3 Objetivos..... 17

1.3.1 General..... 17

1.3.2 Específicos. 17

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO..... 18

2.1 Estado del Arte. 18

2.2 Accidente Cerebrovascular. 19

2.3 Hemiplejia..... 19

2.4 Fisioterapia. 20

2.4.1 Terapia Espejo. 20

2.4.2 Fisioterapia Mediante Robótica..... 20

2.4.3 Exoesqueletos Robóticos de Asistencia para Miembros Superiores. 20

2.4.4 Sistemas Robóticos de Efecto Final para Miembros Superiores..... 20

2.5 Elementos de un Robot Manipulador. 21

2.6 Operadores Cinemáticos. 21

2.6.1 Matrices de Rotación. 22

2.6.2 Matrices de Transformación Homogénea..... 22

2.7 Parámetros de Denavit-Hartenberg para Manipuladores Seriales. 23

2.8 Cinemática Inversa por métodos geométricos 23

2.9 MATLAB. 23

2.10 Robot Operating System..... 23

2.11	ROSBRIDGE.....	24
2.12	Motores Gráficos.	24
2.13	UNITY.....	25
2.14	Meta Quest 2.....	25
2.15	Rehabilitación Mediante Realidad Virtual.	25
3.	CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	26
3.1	Tipo de investigación.....	26
3.2	Diseño de Investigación.....	26
3.3	Operacionalización de variables	26
3.4	Técnicas de recolección de Datos.....	27
3.5	Población de estudio y tamaño de muestra.....	27
3.5.1	Población de estudio.....	27
3.5.2	Tamaño de muestra.	27
3.6	Hipótesis.	28
3.6.1	Hipótesis nula.	28
3.6.2	Hipótesis alternativa.	28
3.7	Métodos de análisis, y procesamiento de datos.....	28
3.7.1	Métodos de análisis.....	28
3.7.2	Procesamiento de datos.....	29
4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1	Resultados.....	38
4.2	Discusión	40
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
5.1	Conclusiones	44
5.2	Recomendaciones	45
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	46
7.	ANEXOS.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Operacionalización de variables.....	26
Tabla 2.- Tamaño de la población 1 – Fisioterapia Tradicional.	27
Tabla 3.- Tamaño de la población 2 – Prototipo de fisioterapia asistida.....	27
Tabla 4.- Tamaño de la muestra 1 – Fisioterapia Tradicional.	28
Tabla 5.- Tamaño de la muestra 2 – Prototipo de fisioterapia asistida.....	28
Tabla 6.- Características de los servomotores DYNAMIXEL [38],[39].....	29
Tabla 7.- Parámetros de Denavit-Hartenberg.	31
Tabla 8.- Media de los tiempos por día de la actividad “limpiar la mesa” de cada infante.	38
Tabla 9.- Análisis Descriptivo de las muestras de fisioterapia tradicional y del Prototipo de fisioterapia asistida.	39
Tabla 10.- Valor p, valor estadístico S de la prueba Mann-Kendall y porcentaje de mejora en los tiempos de cada infante para interactuar con el entorno de realidad virtual.	41
Tabla 11.- Valor p, valor estadístico S de la prueba Mann-Kendall y porcentaje de mejora en los tiempos de cada infante con la fisioterapia tradicional.	42
Tabla 12.- Nivel de eficiencia del prototipo.	43
Tabla 14.- Porcentaje de discapacidad y edad de los pacientes.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Elementos de un robot manipulador [28].	21
Figura 2.- Arquitectura ROS [16].	24
Figura 3.- Conexión de los servomotores DYNAMIXEL al computador mediante un conversor de comunicación USB (U2D2) [40].	30
Figura 4.- a) Articulaciones (Q_n) y eslabones (L_n) del brazo robótico. b) Ubicación de los sistemas de coordenadas en el brazo robótico.	30
Figura 5.- a) Configuración geométrica para el desarrollo de la cinemática inversa. b) Perspectiva lateral de la configuración geométrica para calcular el valor de Q_3	32
Figura 6.- Perspectiva lateral de L_2 y L_3 para calcular el valor de Q_2	33
Figura 7.- Simulación del brazo robótico en MATLAB mediante la cinemática directa. ..	34
Figura 8.- a) Entorno 3D para la interacción del infante. b) Hand Tracking.	35
Figura 9.- Interacción del fisioterapeuta con el infante mediante el prototipo de fisioterapia asistida.	35
Figura 10.- Configuración para el envío de las coordenadas cartesianas del objeto 3D al servidor de ROS.	35
Figura 11.- Diagrama “Multicapas” del prototipo de fisioterapia asistida.	36
Figura 12.- Estructura de reposo.	37
Figura 13.- a) Limpieza de la mesa (Fisioterapia tradicional). b) Limpieza de la mesa (Prototipo).	37
Figura 14.- Tiempos obtenidos con la fisioterapia tradicional y con el prototipo.	38
Figura 15.- Resultado de la prueba de Kolmogórov-Smirnov obtenido con RStudio.	39
Figura 16.- Resultado de la prueba de Wilcoxon obtenido con RStudio.	40
Figura 17.- Distribución de datos de las muestras.	40
Figura 18.- Tiempos de los infantes al realizar la actividad con el prototipo.	40
Figura 19.- a) Línea de tendencia decreciente para los tiempos con el prototipo en el Infante 1. b) Línea de tendencia decreciente para los tiempos con el prototipo en el Infante 2. c) Línea de tendencia decreciente para los tiempos con el prototipo en el Infante 3.	41
Figura 20.- a) Línea de tendencia decreciente para los tiempos de la terapia tradicional en el Infante 1. b) Línea de tendencia decreciente para los tiempos de la terapia tradicional en el Infante 2. c) Línea de tendencia decreciente para los tiempos de la terapia tradicional en el Infante 3.	42

Figura 21.- Certificado emitido por la Unidad Educativa Especializada "Carlos Garbay Montesdeoca" Riobamba - Ecuador. 51

RESUMEN

Esta investigación detalla el estudio de un prototipo de fisioterapia asistida para infantes con hemiplejía izquierda que pertenecen a la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca”. Antes de empezar con el desarrollo del proyecto, se analizó la factibilidad que este presenta mediante el estado del arte. En el marco teórico se detallan conceptos claves que fueron tomados en cuenta para la creación del prototipo, haciendo posible la combinación de tecnologías como la robótica y la realidad virtual, cumpliendo con cada uno de los objetivos planteados. Se hizo un análisis estadístico no paramétrico para comparar los tiempos de ejecución de una actividad de la vida diaria (limpiar la mesa) que realizaron los infantes mediante fisioterapia tradicional y con el prototipo, concluyendo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, dando paso al cálculo del nivel de eficiencia del prototipo. Por último, se detallan las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

Palabras claves: Hemiplejía, Robótica, Realidad Virtual, ROS.

ABSTRACT

This research details the study of a prototype of assisted physiotherapy for infants with left hemiplegia who belong to the “Carlos Garbay Montesdeoca” Specialized Educational Unit. Before starting the development of the project, its feasibility was analyzed through the state of the art. The theoretical framework details key concepts that were considered for the creation of the prototype, making possible the combination of technologies such as robotics and virtual reality and meeting each of the stated objectives. A non-parametric statistical analysis was carried out to compare the execution times of a daily life activity (cleaning the table) that the infants performed through traditional physiotherapy and with the prototype, concluding that the null hypothesis is rejected, and the alternative hypothesis is accepted, giving way to the calculation of the efficiency level of the prototype. Finally, conclusions and recommendations for future research are detailed.

Keywords: Hemiplegia, Robotics, Virtual Reality, ROS.



firmado electrónicamente por:
MARIO NICOLAS
SALAZAR RAMOS

Revised by
Mario N. Salazar

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Introducción.

La hemiplejia se define como una lesión en los nervios de la médula espinal o del encéfalo, provocando que el suministro de sangre hacia el cerebro sea insuficiente debido a un bloqueo arterial. El cerebro al sufrir estas lesiones características de la hemiplejia provoca una pérdida de movimiento y de sensibilidad en el rostro, en miembros superiores, en miembros inferiores o de ambos miembros de la mitad del cuerpo. La hemiplejia también afecta el habla, la capacidad auditiva, la visión y la capacidad de razonamiento [1]. La hemiplejia puede causar gran impacto en la calidad de vida del paciente, así que es de vital importancia seguir un procedimiento de rehabilitación para su debida recuperación. La tecnología permite el desarrollo de sistemas robóticos que puedan realizar tareas de fisioterapia a aquellos pacientes que hayan sufrido un accidente cerebrovascular [2].

Gracias a los avances tecnológicos se puede crear sistemas de apoyo que brindan una asistencia fisioterapéutica. Los robots son máquinas que pueden ser programadas con un propósito médico y así brindar ayuda a aquellos pacientes que la necesiten [2]. Como en cualquier sistema informático se necesita de un sistema operativo que gestione los recursos de la máquina [3], así también se necesita de un sistema operativo diseñado para el uso o manejo de robots y es por esto por lo que el estudio del presente proyecto de investigación se enfoca en la implementación de Robot Operating System (ROS). ROS se caracteriza en ser de código abierto para que los desarrolladores puedan crear sus propios proyectos sin límites. ROS es un metasistema operativo, ya que este se instala sobre otro sistema operativo como lo que es Ubuntu. ROS también se caracteriza por la integración o uso de diferentes nodos, haciendo que cada nodo sea autónomo en un mismo proyecto. Cada nodo interactúa entre sí por medio del protocolo XML-RCP haciendo posible la programación en diferentes lenguajes como Python, Java y C++ [4]. ROS hace uso del protocolo TCP/IP para que exista una conexión cliente-servidor. La base del funcionamiento de ROS es mediante la publicación de tópicos a los cuales se pueden suscribir diferentes nodos. Los nodos se los considera como elementos externos que interactúan con el tópico principal (posición del brazo robótico) y en este proyecto de investigación el entorno de realidad virtual es un nodo.

La realidad virtual es una tecnología que puede ser utilizada para generar recursos didácticos [5]. La realidad virtual parte de conceptos de imágenes tridimensionales, que dan lugar a la visualización e interacción, donde el usuario puede experimentar dentro de un entorno 3D generado por un motor gráfico. Existen gafas de realidad virtual que están equipadas con cámaras infrarrojas que permiten el seguimiento de ubicación, el seguimiento de manos, con resolución por ojo de 1832×1920, con una frecuencia de actualización de 90 Hz y con un campo de visión de alrededor de 120° [6].

Una vez abordado los conceptos principales de este proyecto de investigación, se pretende desarrollar un prototipo de fisioterapia asistida para infantes con hemiplejia izquierda que pertenecen a la Unidad Educativa Especializada "Carlos Garbay Montesdeoca" Riobamba – Ecuador mediante robótica y realidad virtual, con la finalidad de mejorar el tiempo de

ejecución de la actividad de la vida diaria “limpiar la mesa”. Esta actividad de la vida diaria es uno de los principales ejercicios que son realizados en el área de terapia ocupacional de dicha institución.

1.2 Planteamiento del Problema.

En el Ecuador los accidentes cerebrovasculares están entre las principales causas de muerte, representando el 4,4% de 41.077 decesos registrados en el 2020 [7]. Los síntomas de un accidente cerebrovascular son problemas de lenguaje o mal pronunciamiento, una sonrisa torcida y parálisis de la mitad del cuerpo como lo que es la hemiplejia, el paciente que la sufre pierde movilidad en sus miembros superiores e inferiores, con la posibilidad de ocasionar la muerte si no se realiza un tratamiento adecuado. Otros efectos que provoca la hemiplejia es la alteración, lineación y postura del cuerpo, en consecuencia, el paciente corre el riesgo de sufrir caídas provocando más lesiones en su cuerpo.

Según la página web oficial del Consejo Nacional de Discapacidades (CONADIS), al día que se desarrolló este proyecto de investigación, en la ciudad de Riobamba se encontraron registrados 139 infantes con discapacidad física entre las edades de 0 a 12 años, pero no se especifica el diagnóstico de la discapacidad [8]. Los infantes al no experimentar nuevos métodos o técnicas para la respectiva rehabilitación de sus miembros superiores e inferiores pueden desarrollar una baja expectativa de una recuperación temprana, haciendo que el tiempo de duración de la rehabilitación se prolongue por más tiempo con terapias monótonas y repetitivas.

Para el desarrollo de esta investigación surgen las siguientes preguntas:

¿Cómo se puede mejorar la calidad de vida de los infantes con hemiplejia y facilitar su proceso de rehabilitación para lograr una recuperación temprana y efectiva de sus miembros superiores e inferiores?

Para mejorar la calidad de vida de los infantes con hemiplejia se debe considerar tratamientos fisioterapéuticos que sean intensivos, como el detallado en el estudio de Jiménez María y Maridueña Verónica. Las autoras concluyen que este tipo de tratamientos ofrecen mejores resultados con respecto a la calidad de vida de los pacientes que presentan secuelas a causa de un accidente cerebrovascular, detallando que mientras más rápido inicie la rehabilitación fisioterapéutica, mayor será la calidad de vida del paciente [9].

¿Cómo se pueden implementar nuevas técnicas y tecnologías de rehabilitación siendo una herramienta de ayuda para los fisioterapeutas y así mejorar el tiempo de ejecución de las actividades de la vida diaria en infantes con hemiplejia izquierda en la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba - Ecuador?

Los infantes no sienten la responsabilidad de seguir un tratamiento fisioterapéutico como si lo hiciese una persona adulta. Las fisioterapias se resumen en sesiones poco agradables y sin

gracia para los infantes, haciendo que pierdan interés en seguir un tratamiento, es por esto por lo que al integrar diferentes tecnologías pueden despertar el interés y así seguir un tratamiento fisioterapéutico más interactivo y divertido, ayudando a los fisioterapeutas a promover o incentivar la rehabilitación en los infantes, mejorando el tiempo de ejecución de las actividades de la vida diaria.

1.3 Objetivos.

1.3.1 General.

- Desarrollar un prototipo de fisioterapia asistida utilizando tecnologías de robótica y realidad virtual para infantes con hemiplejía izquierda entre los nueve y once años, de la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba – Ecuador.

1.3.2 Específicos.

- Realizar la modelación de cinemática directa mediante los parámetros de Denavit-Hartenberg y la cinemática inversa mediante el método geométrico para el estudio y simulación de un brazo robótico de tres grados de libertad en Matlab, asegurando su compatibilidad con un entorno realidad virtual.
- Diseñar y desarrollar un entorno de realidad virtual con el motor gráfico Unity, que permita una interacción adecuada entre el usuario y el brazo robótico por medio de una aplicación compatible con gafas de realidad virtual.
- Implementar la arquitectura ROS para establecer la comunicación entre el entorno de realidad virtual y el brazo robótico mediante el protocolo de Rosbridge.
- Comparar los tiempos de ejecución de una actividad de la vida diaria utilizando fisioterapia tradicional versus el prototipo de fisioterapia asistida en infantes con hemiplejía izquierda entre los nueve y once años, de la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” Riobamba – Ecuador, para determinar el nivel de eficiencia del prototipo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Estado del Arte.

La autora González Beatriz en su trabajo de titulación, detalla el uso de la terapia de espejo en pacientes post accidente cerebrovascular enfocándose en el miembro superior. La autora concluye que el uso de la terapia de espejo en pacientes que hayan sufrido de un accidente cerebrovascular es eficiente si se la realiza a tiempo y periódicamente ya que es muy beneficioso en la recuperación motora del miembro superior, mejorando el equilibrio, la coordinación, mejorando las funciones de agarre y pinza, a su vez, incrementando el desarrollo de las actividades del día a día del paciente [10].

La autora Anaís David en su trabajo de investigación, concluye que la realidad virtual puede ser implementada como una herramienta más motivadora para realizar rehabilitaciones de parálisis cerebral. Según la autora, espera disminuir la espasticidad hemipléjica, con el objetivo de mejorar la función motora de la mano y del miembro superior del infante. La autora enfatiza que, si el infante pierde motivación para continuar con la rehabilitación mediante realidad virtual, se debe a que hubo una interrupción en el tratamiento [11].

La autora Bastidas Shirley en su investigación, se basa en evidenciar los efectos y beneficios de la realidad virtual que promueve la independencia en el área de las actividades básicas de la vida diaria en el paciente hemipléjico. La autora concluye que los efectos de la rehabilitación mediante realidad virtual en las actividades del día a día fueron positivos, tomando en cuenta que dichos beneficios incrementan al combinar varios métodos de tratamiento convencional [12].

La autora Yamada-Rice Dylan con su equipo de investigación, detallan que la realidad virtual es una tecnología atractiva para los infantes, pero existen preocupaciones sobre posibles problemas de salud y de seguridad, enfocándose en los posibles efectos nocivos que pueden tener los infantes menores de trece años. Los autores toman la decisión de trabajar con infantes de ocho a doce años porque consideran que es menos probable que los menores de ocho años fueran un mercado de adopción temprana para este tipo de tecnologías ya que las gafas de realidad virtual son dispositivos grandes y pesados para el cuello y la cabeza de los niños más pequeños. Los autores en su apartado de salud y seguridad concluyen que, para la agudeza visual de los infantes, han encontrado poca diferencia entre el antes y después de haber jugado en un entorno de realidad virtual, pero en un número muy pequeño de casos, la estabilidad postural y la estereoagudeza (percepción de profundidad) empeoraron [13].

El autor Romero Marlon en su investigación bibliográfica, detalla la influencia que presenta la robótica en la rehabilitación para pacientes hemipléjicos, a su vez, concluye que la práctica de los ejercicios planteados para el tratamiento ya sea en base a la realidad virtual, uso de dispositivos robóticos y fisioterapia tradicional, permiten un mejor enfoque para la neuroplasticidad y que la terapia robótica genera cambios significativos dentro de la calidad de vida del paciente. Mediante esta investigación el autor reconoce que se debe realizar más

estudios enfocados a infantes, ya que los dispositivos robóticos solo han sido probados en adultos [14].

Díaz Raúl en su trabajo final de máster, da a conocer que los sistemas robóticos son efectivos para realizar terapias asistidas ya que las terapias tradicionales pueden ser exhaustivas y agotadoras para los pacientes. Esto provoca desmotivación y con ello una disminución en el compromiso del tratamiento. En el trabajo de investigación se detalla que gracias a los avances tecnológicos como la realidad aumentada, realidad virtual y la gamificación, en conjunto con el uso de exoesqueletos, se puede incrementar la motivación del paciente durante su proceso de rehabilitación, sin embargo, el autor recalca que en el proceso de rehabilitación del paciente es imprescindible la presencia de un fisioterapeuta durante toda la terapia ya que estos sistemas robóticos son de ayuda tanto para el paciente como para el fisioterapeuta [15].

Tovar Manuel en su trabajo de fin de grado, propone el desarrollo de una interfaz de realidad virtual para la teleoperación de robots móviles o robots unicycle. En su trabajo hace uso de Robot Operating System (ROS) y de Gazebo. Gazebo es un entorno en 3D, en donde el usuario o desarrollador puede integrar sus robots para realizar pruebas de simulación. Tovar también describe el uso de Rosbridge, el cual es un paquete que permite la comunicación entre Unity y ROS para facilitar una comunicación maestro-esclavo mediante sockets TCP-IP. El autor finalmente describe que para trabajos futuros se debe realizar pruebas con un robot real ya que su funcionamiento debe ser el mismo que en la simulación realizada [16].

2.2 Accidente Cerebrovascular.

Uno de los principales motivos de discapacidad motora es ocasionado por los accidentes cerebrovasculares, representando la segunda causa de muerte a nivel mundial y en Ecuador siendo la primera causa de muerte como lo indican en varios estudios [7], [9], [10]. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), existen dos tipos de accidentes cerebrovasculares. El accidente cerebrovascular isquémico que es causado por la obstrucción de un vaso sanguíneo, y el accidente cerebrovascular hemorrágico que es causado por hemorragia intracerebral [17]. Un accidente cerebrovascular ocasiona complicaciones motrices o sensoriales presentando varios síntomas como la pérdida de fuerza en el rostro y extremidades, pérdida de sensibilidad y hormigueos específicamente en un solo lado del cuerpo. También se presentan dificultades para hablar, desorientación, problemas de memoria, visión y pérdida del equilibrio [10].

2.3 Hemiplejia.

Un accidente cerebrovascular deja secuelas significativas en las personas que lo padecen, presentando complicaciones motrices como lo es la hemiplejia. La hemiplejia hace que el individuo experimente dificultades en el control voluntario de sus miembros superiores e inferiores [18], esto quiere decir que la hemiplejia se caracteriza por ser una lesión cerebral que provoca una parálisis del hemicuerpo contralateral con respecto al hemisferio del

cerebro dañado [12]. Los infantes con hemiplejia utilizan el lado del cuerpo que mejor capacidad motora presenta, siendo el lado dominante el que se encarga de todas las actividades de la vida diaria. Al no utilizar el lado afectado, genera problemas de psicomotricidad, debilidad y maduración musculoesquelética retrasada [19].

2.4 Fisioterapia.

La fisioterapia ayuda con el deterioro de los músculos, este deterioro muscular lo sufren aquellas personas que no pueden utilizar ciertas partes de su cuerpo debido a que los músculos se contraen. Existen aparatos ortopédicos que son útiles para realizar procedimientos fisioterapéuticos [20].

2.4.1 Terapia Espejo.

Existen diferentes tipos de rehabilitación para miembros superiores tras una hemiplejia, y una de ellas es la terapia espejo. El uso de este tipo de rehabilitación se caracteriza por movimientos repetitivos bimanuales en donde que el paciente mueve el miembro superior afectado tanto como pueda, mientras que observa el movimiento del miembro superior sano en un espejo [21].

2.4.2 Fisioterapia Mediante Robótica.

El ser humano con el pasar del tiempo ha desarrollado o creado herramientas, con el propósito de hacer su vida más fácil. Las herramientas tecnológicas como la robótica se han introducido en el día a día de las personas más rápido que nunca [22]. La robótica está presente en la fisioterapia para brindar asistencia a aquellos pacientes que la necesiten, esto quiere decir que la robótica asistida se puede diferenciar con relación a su propósito o categoría, formando una clasificación de exoesqueletos y sistemas robóticos de efector final [23].

2.4.3 Exoesqueletos Robóticos de Asistencia para Miembros Superiores.

Los exoesqueletos robóticos de asistencia son máquinas que requieren de una interacción humana para su debido funcionamiento. Algunas de estas tecnologías cuentan con Inteligencia Artificial (IA) para el procesamiento de bioseñales [24]. Este tipo de exoesqueletos robóticos se acoplan a lo largo del miembro superior del paciente para generar los movimientos necesarios para su respectiva rehabilitación. Claro ejemplo de esta tecnología es desarrollado por la empresa Harmonic Bionics, que con su dispositivo el Harmony SHR es capaz de realizar fisioterapias asistidas a aquellos pacientes que hayan sufrido lesiones neurológicas, trastornos neuromusculares, entre otros [25].

2.4.4 Sistemas Robóticos de Efector Final para Miembros Superiores.

Los sistemas robóticos de efector final también son utilizados para la rehabilitación en miembros superiores. Estos sistemas se caracterizan por tener una interacción hombre-

máquina y a su vez presentan un entorno virtual que es simulado por computadora. Su funcionamiento consiste en que el paciente debe tomar la parte final del sistema robótico (efector final) e ir moviendo el miembro superior según las instrucciones que esté visualizando en un monitor [26]. Un ejemplo de este sistema robótico de efector final se refleja en el proyecto denominado ROBOESPAS, cuyo propósito es realizar fisioterapias a personas con espasticidad en el miembro superior [27].

2.5 Elementos de un Robot Manipulador.

Un robot manipulador se caracteriza por los elementos que componen su estructura (Figura 1) teniendo un parecido al brazo humano. Según la norma ISO 8373:2012 [28], Brazo es el “conjunto de eslabones y articulaciones (grados de libertad) interconectadas que posicionan la muñeca”. Eslabón es el “cuerpo rígido que mantiene unidas las articulaciones”. Articulación prismática es la “unión entre dos eslabones que permite a uno de ellos tener un movimiento lineal en relación con el otro”. Articulación rotacional es la “unión entre dos eslabones que permite a uno de ellos tener un movimiento giratorio alrededor del otro”.

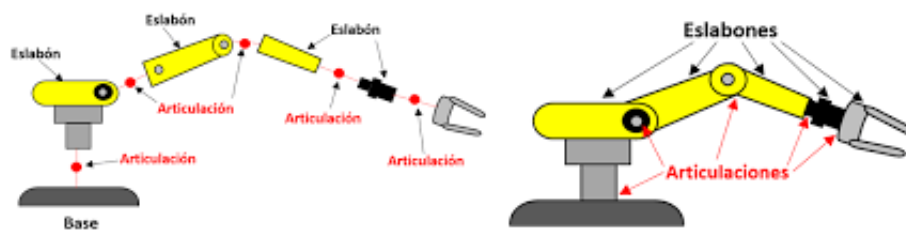


Figura 1.- Elementos de un robot manipulador [29].

2.6 Operadores Cinemáticos.

Para estudiar el movimiento realizado por los robots hay que tomar en cuenta los movimientos de rotación y traslación. Los movimientos de los robots deben estar descritos de manera adecuada para que mantengan un orden determinado mediante la asignación de un conjunto de sistemas de coordenadas para cada uno de los eslabones que forman parte del robot. Si se desea que un robot realice una tarea específica, se debe considerar el conjunto de puntos que forman parte de la trayectoria por la cual se moverá el efector final. Estos puntos se los puede ubicar mediante vectores independientemente de la ubicación del sistema de coordenadas que se esté utilizando en el espacio. Cuando se tiene distintos vectores y cada uno se expresa con respecto a un sistema de coordenadas diferente, se puede realizar operaciones entre ellos siempre y cuando los vectores apunten al mismo punto en el espacio y para ello se utiliza [30]:

- “Matrices de rotación cuando los sistemas de referencia sólo difieren en su orientación”.
- “Matrices de transformación homogénea cuando los sistemas de referencia difieren tanto en la posición de su origen como en su orientación relativa”.

2.6.1 Matrices de Rotación.

Es de suma importancia distinguir las matrices de rotación básicas las cuales son tres. Estas matrices de rotación básicas representan cuando un sistema de coordenadas rota con respecto a cualquier eje principal (x, y, z) [30]. La representación de las matrices de rotación básicas es de la siguiente manera:

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{sen}\alpha \\ 0 & \text{sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \text{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En donde que la variable R representa el nombre de la matriz, con sus subíndices representando los ejes principales (x, y, z) y siendo los ángulos de rotación (α, ϕ, θ).

2.6.2 Matrices de Transformación Homogénea.

Las matrices de transformación homogénea relacionan un sistema de coordenadas (i)-ésimo con el sistema de coordenadas (i-1)-ésimo, representando la orientación y posición de un sistema con respecto a otro sistema fijo, dando como resultado la siguiente ecuación [31]:

$$A_i^{i-1} = R_{z,\theta} * T_{z,d} * T_{x,\alpha} * R_{x,\alpha}$$

Dando como resultado la siguiente matriz para articulaciones rotacionales:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i * s\theta_i & s\alpha_i * s\theta_i & \alpha_i * c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i * c\theta_i & -s\alpha_i * c\theta_i & \alpha_i * s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Y para articulaciones prismáticas se obtiene la siguiente matriz:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i * s\theta_i & s\alpha_i * s\theta_i & 0 \\ s\theta_i & c\alpha_i * c\theta_i & -s\alpha_i * c\theta_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.7 Parámetros de Denavit-Hartenberg para Manipuladores Seriales.

Las características cinemáticas de un robot manipulador pueden ser descritas mediante la convención de Denavit-Hartenberg. Esta convención tiene origen en 1955 y se ha utilizado para “describir las características cinemáticas de los mecanismos espaciales que comprenden las articulaciones de un solo eje” [32]. La mencionada convención se basa en un método matricial que establece de manera sistemática un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón de una cadena articulada, obteniendo como resultado una matriz de transformación homogénea en base a las características de la estructura, indicando las limitaciones físicas del robot [31], [32]. Los parámetros de Denavit-Hartenberg dependen de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que une dichos eslabones.

2.8 Cinemática Inversa por métodos geométricos

El uso de la cinemática inversa por métodos geométricos es útil para robots que cuentan con pocos grados de libertad o para cuando se quiere considerar solamente los primeros grados de libertad, con la finalidad de posicionar el efector final a una coordenada cartesiana conocida mediante relaciones geométricas a partir de las características físicas del robot [33].

2.9 MATLAB.

MATLAB es una herramienta poderosa para álgebra lineal y presentación gráfica que está disponible para diferentes plataformas informáticas. La herramienta presenta su propio lenguaje de programación denominado M. Una de las funciones principales de MATLAB es que permite ampliar sus capacidades mediante la incorporación de toolboxes o cajas de herramientas. Robotics Toolbox es una de ellas y esta permite el estudio de robótica en el entorno de MATLAB, tomando en cuenta áreas como la cinemática, dinámica y la generación de trayectorias, esto es útil para la simulación, así como para analizar los resultados de experimentos con robots reales. Toolbox se basa en un método muy general de representar la cinemática y la dinámica de los manipuladores de enlace serial mediante matrices [34].

2.10 Robot Operating System.

Robot Operating System (ROS), es un conjunto de bibliotecas de software y herramientas utilizadas para desarrollar sistemas robóticos. ROS es conocido por ser un sistema operativo de código abierto [34]. En otras palabras, ROS se basa en una arquitectura de gráficos, en donde que el procesamiento de datos los realiza distintos nodos los cuales pueden recibir, enviar y multiplexar mensajes de sensores, estados, actuadores, entre otros. La comunicación entre nodos se puede realizar mediante la publicación de tópicos ya que estos envían mensajes sin la necesidad de esperar una respuesta del suscriptor, siendo así un mecanismo ideal para la teleoperación de robots [16].

En la Figura 2 se puede observar el mecanismo de comunicación que proporciona la arquitectura ROS. El nodo publicador envía mensajes periódicamente a un tópico y estos

mensajes pueden contener datos (como por ejemplo los datos de un sensor). El nodo suscriptor puede acceder al t3pico en cualquier momento mediante una suscripci3n y as3 obtener los datos del mensaje. La comunicaci3n entre nodos no es 3nicamente punto a punto ya que tambi3n pueden existir varios nodos que se suscriben al mismo t3pico. Esto genera una comunicaci3n 3ptima, por lo que no se necesita una respuesta del suscriptor.

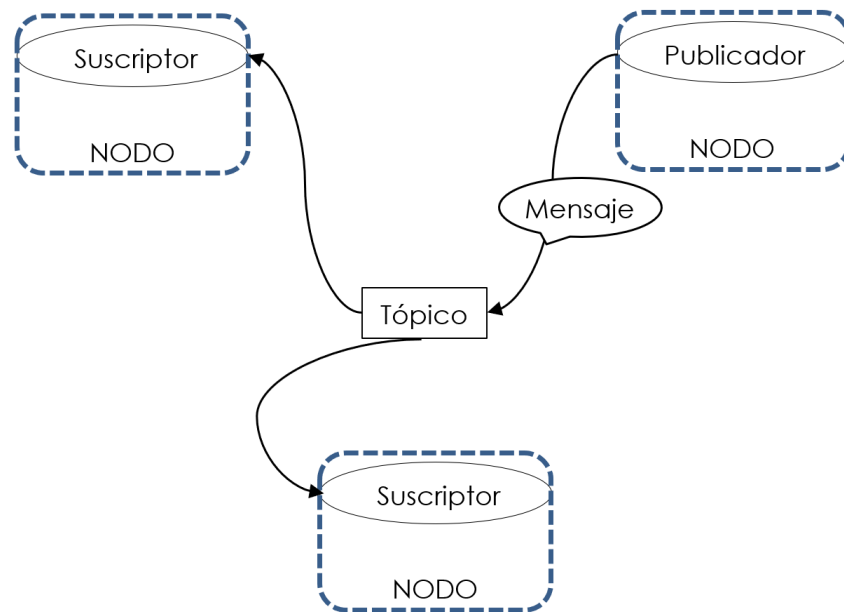


Figura 2.- Arquitectura ROS [16].

2.11 ROSBRIDGE.

ROSBRIDGE es un paquete que funciona mediante un formato de intercambio de datos f3cil de leer y escribir denominado JavaScript Object Notation (JSON), y mediante una Interfaz de Programaci3n de Aplicaciones (API) para facilitar la comunicaci3n entre ROS y programas externos. ROSBRIDGE se conforma por paquetes de `roslaunch`, los cuales son [16]:

- **roslaunch_library:** Este paquete es principal ya que se encarga de leer la cadena JSON y tambi3n se encarga de enviar los comandos a ROS y viceversa.
- **roslaunch_sapi:** Este paquete permite que ciertas acciones de ROS sean accesibles a trav3s de llamadas de servicio.
- **roslaunch_server:** Este paquete se caracteriza por brindar una capa de transporte WebSocket, siendo esta una capa de comunicaci3n bidireccional de baja latencia entre clientes y servidores.

2.12 Motores Gr3ficos.

Un motor gr3fico o motor de juego se relaciona con rutinas de programaci3n con el objetivo de dise1ar y crear videojuegos. Un motor gr3fico sirve para generar una representaci3n visual o interactiva a partir de datos y c3digo de objetos tanto en 2D como en 3D (renderizar). Los

motores gráficos también cuentan con un motor físico para la simulación de colisiones, gravedad, inercia, etc [36].

2.13 UNITY.

Con el paso del tiempo, los videojuegos han evolucionado a la par con las herramientas de desarrollo (motores gráficos). Algunos motores gráficos han evolucionado para ser de uso libre y uno de ellos es Unity. Unity es un motor gráfico muy versátil que permite renderizar gráficos en 2D y en 3D [37]. Además, permite crear proyectos multiplataforma, ya sea para PC, Android, IOS, Play Station, XBOX, Gafas de Realidad Virtual, entre otros.

2.14 Meta Quest 2.

Meta Quest 2 es la segunda generación de gafas de realidad virtual creadas por la empresa de Mark Zuckerberg (Meta). La tecnología de las Meta Quest 2 ofrece una experiencia inmersiva y fluida a los usuarios dentro de un entorno 3D generado por un motor gráfico. Estas gafas de realidad virtual son autónomas ya que no necesitan de ningún tipo de cámara externa o sensor para su correcto funcionamiento ni de ningún computador que realice el procesamiento gráfico, ya que integran un procesador Qualcomm Snapdragon XR2, diseñado específicamente para gafas de realidad virtual. Sin embargo, las gafas, pueden conectarse a un computador mediante un cable. Por otro lado, las mencionadas gafas poseen cuatro cámaras con sensor de movimiento, permitiendo realizar un trackeo o procesamiento de imagen para el escaneo de manos y así integrarlas dentro del entorno de realidad virtual [38].

Meta Quest 2 cuenta con controladores o mandos táctiles que ofrecen un mejor seguimiento de los movimientos por parte de los sensores de las cámaras, al igual que incorporan botones, palancas (joystick) y tecnología háptica (sistema de vibración generada por motores). Las Meta Quest 2 poseen una pantalla de cristal líquido (LCD) con una resolución de 1832x 1920 por ojo a una frecuencia de 90 Hz y con un modo experimental de 120 Hz [38].

2.15 Rehabilitación Mediante Realidad Virtual.

La realidad virtual es una herramienta que brinda la capacidad de interacción entre el paciente y el entorno virtual logrando la estimulación motora, perceptiva y cognitiva. Bastidas Shirley, en su investigación bibliográfica, detalla que la realidad virtual es un método innovador para la sanación de la función motora de los pacientes. La realidad virtual puede mejorar la neuroplasticidad (adaptación del cerebro para aprender nuevas cosas) mediante juegos interactivos integrando niveles de dificultad. Los pacientes consideran que la realidad virtual ayuda a incrementar el compromiso para cumplir con el tratamiento de rehabilitación [13].

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Tipo de investigación.

El presente proyecto de investigación se enfocó en la creación de un prototipo fisioterapéutico siendo así de tipo aplicativo y de desarrollo, con propósitos prácticos y específicos para comprender la factibilidad de la combinación de tecnologías como la robótica y la realidad virtual para infantes con hemiplejía.

3.2 Diseño de Investigación.

El diseño de esta investigación es experimental controlado, por la selección de infantes con hemiplejía izquierda que forman parte de la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca”.

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 1.- Operacionalización de variables.

Variable Independiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Estado del miembro superior del infante (sano o afectado).	Miembro superior del infante que utiliza para realizar la acción de limpiar la mesa.	Porcentaje de discapacidad física.	-Mesa con pizarra blanca. -Marcador para pizarra. -Borrador de pizarra. -Brazo Robótico. -Realidad Virtual.
Variables Dependientes	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Tiempo en que le toma al infante limpiar la mesa con el miembro superior izquierdo (Fisioterapia tradicional).	Medición del tiempo para completar la tarea con el miembro superior izquierdo.	Unidad de medida (Segundos)	Cronómetro
Tiempo en que le toma al infante limpiar la mesa con el prototipo de fisioterapia asistida.	Medición del tiempo para completar la tarea con el prototipo de fisioterapia asistida.	Unidad de medida (Segundos)	Cronómetro

3.4 Técnicas de recolección de Datos.

Para la recolección de datos se tiene dos escenarios. El primer escenario corresponde al infante limpiando la mesa con el miembro superior izquierdo (fisioterapia tradicional), mientras que, el segundo escenario corresponde al uso del prototipo para limpiar la mesa que se encuentra en el entorno de realidad virtual. En ambos escenarios, se midieron los tiempos en que tardaron los infantes para completar la actividad.

3.5 Población de estudio y tamaño de muestra.

3.5.1 Población de estudio.

La población de estudio está definida por los datos que fueron recolectados en la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca”, que representan los tiempos de ejecución de la actividad asignada a cada uno de los infantes mediante la fisioterapia tradicional y con el prototipo de fisioterapia asistida. La toma de tiempos se realizó 3 veces por día a lo largo de 17 días como se detalla en la Tabla 2 y en la Tabla 3.

Tabla 2.- Tamaño de la población 1 – Fisioterapia Tradicional.

Número de Infantes	Toma de tiempos por día	Días	Tamaño de la Población 1
3	3	17	153 datos

Tabla 3.- Tamaño de la población 2 – Prototipo de fisioterapia asistida.

Número de Infantes	Toma de tiempos por día	Días	Tamaño de la Población 2
3	3	17	153 datos

3.5.2 Tamaño de muestra.

El tamaño de las muestras de las poblaciones finitas fue calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2 * N * p * q}{E^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra.

Z: Puntuación 1.96 con un nivel de confianza del 95%.

N: Tamaño de la población.

p: Satisfacción positiva del 50%.

q: Satisfacción negativa (1-p) del 50%.

E: Error de estimación máximo permitido del 5%.

Dando como resultado el tamaño de las muestras.

$$n = \frac{1.96^2 * 153 * 0.5 * 0.5}{0.05^2 * (153 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = 112.89 \approx 113$$

La ecuación para calcular el tamaño de las muestras dio como resultado 113 datos y para cumplir con dicho tamaño, se modificó la toma de tiempos a 2 veces por día a lo largo de 19 días, para la obtención de 114 datos (valor muy cercano a los 113 datos) como se detalla en la Tabla 4 y en la Tabla 5.

Tabla 4.- *Tamaño de la muestra 1 – Fisioterapia Tradicional.*

Número de Infantes	Toma de tiempos por día	Días	Tamaño de la Muestra 1
3	2	19	114 datos

Tabla 5.- *Tamaño de la muestra 2 – Prototipo de fisioterapia asistida.*

Número de Infantes	Toma de tiempos por día	Días	Tamaño de la Muestra 1
3	2	19	114 datos

Los datos de cada muestra fueron analizados con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

3.6 Hipótesis.

3.6.1 Hipótesis nula.

$$H_0: \mu_1 \leq \mu_2$$

El tiempo que tardan los infantes en completar la tarea con fisioterapia tradicional (μ_1) es menor o igual que el tiempo que los lleva con el prototipo de fisioterapia asistida (μ_2).

3.6.2 Hipótesis alternativa.

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

El tiempo que tardan los infantes en completar la tarea con fisioterapia tradicional (μ_1) es mayor que el tiempo que los lleva con el prototipo de fisioterapia asistida (μ_2).

3.7 Métodos de análisis, y procesamiento de datos.

3.7.1 Métodos de análisis.

Para verificar si la diferencia de las muestras recolectadas en la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca” se ajustan a una distribución normal se utilizó

la prueba de Kolmogórov-Smirnov. Al demostrar que la diferencia entre ambas muestras no se ajusta a una distribución normal se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para sacar conclusiones ante la hipótesis planteada. También se realizó diagramas de cajas facilitando la interpretación y análisis de los datos recolectados.



3.7.2 Procesamiento de datos.

El presente proyecto de investigación cuenta con diferentes apartados que corresponden al procesamiento y manejo de datos que hacen posible la combinación de la robótica y de la realidad virtual, con el fin de brindar una fisioterapia asistida.

3.7.2.1 Servomotores DYNAMIXEL.

El brazo robótico posee dos servomotores DYNAMIXEL MX-106T y tres servomotores DYNAMIXEL XM430-W350-T. Las principales características de estos servomotores son detalladas en la Tabla 6.

Tabla 6.- Características de los servomotores DYNAMIXEL [39],[40].

Modelo	MCU	Baud Rate	Torque
 <p>DYNAMIXEL MX-106T</p>	ARM CORTEX-M3 (72 MHz, 32 bits)	9600 bps ~ 4 Mbps	<p>-8.0 Nm (11.1 V, 4.8 A). -8.4 Nm (12 V, 5.2 A). -10,0 Nm (14.8 V, 6.3 A).</p>
 <p>DYNAMIXEL XM430- W350-T</p>	ARM CORTEX-M3 (72 MHz, 32 bits)	9600 bps ~ 4 Mbps	<p>-3.8 N.m (11.1 V, 2.1 A). -4.1 N.m (12.0 V, 2.3 A). -4.8 N.m (14.8 V, 2.7 A).</p>

Ambos modelos de servomotores cuentan con el firmware actualizado para establecer la comunicación con el protocolo DYNAMIXEL 2.0. El firmware fue actualizado con el software DYNAMIXEL Wizard 2.0, el cual también permitió configurar de una manera fácil los servomotores, dándoles un ID propio, seleccionando el baud rate, restringiendo el rango de movimiento, y seleccionando el modo de funcionamiento. Los servomotores son alimentados con una fuente de 12 V, 7 A esto quiere decir que los modelos MX-106T operan con un torque de 8.4 Nm, mientras que, los modelos XM430-W350-T operan con un torque

de 4.1 Nm. Los servomotores con mayor torque son posicionados a la altura del hombro del paciente para que tengan la facilidad de mover todo el miembro superior y los servomotores con menor torque se desplazan a lo largo del antebrazo del paciente, empezando desde el codo hasta la muñeca. Para leer y escribir datos en los servomotores desde un computador se utilizó el conversor de comunicación USB (U2D2) tal y como se muestra en la Figura 3.

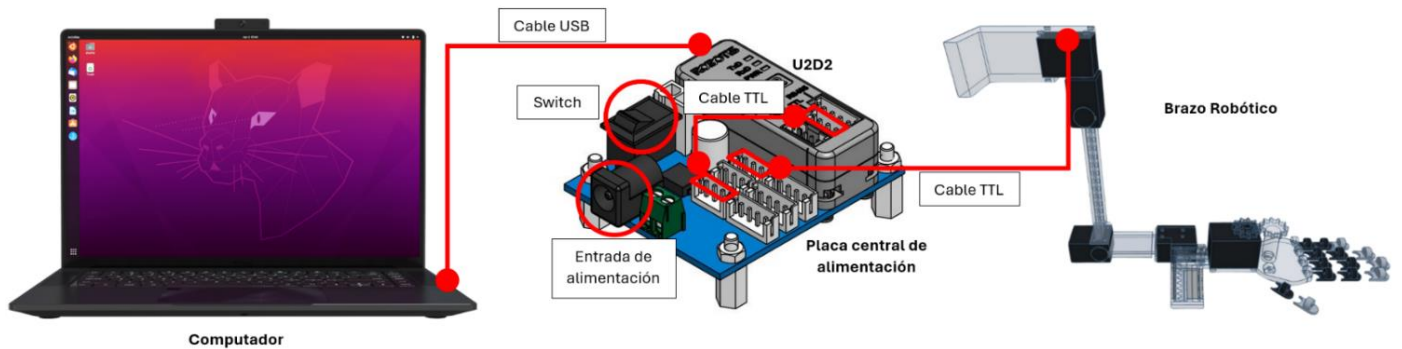


Figura 3.- Conexión de los servomotores DYNAMIXEL al computador mediante un conversor de comunicación USB (U2D2) [41].

3.7.2.2 Robótica.

Para el apartado de la robótica se desarrolló la cinemática directa tomando en cuenta las características físicas del brazo robótico (Figura 4 literal a) para la obtención de los parámetros de Denavit-Hartenberg mientras que para la cinemática inversa se tomó en cuenta el método geométrico (Figura 5). Ambas cinemáticas fueron programadas en MATLAB.

El brazo robótico está compuesto por cinco grados de libertad, de los cuales, los tres primeros son tomados en cuenta con sus sistemas de coordenadas (Figura 4 literal b) para obtener los parámetros de Denavit-Hartenberg, y los dos últimos son para darle orientación y acción al efector final.

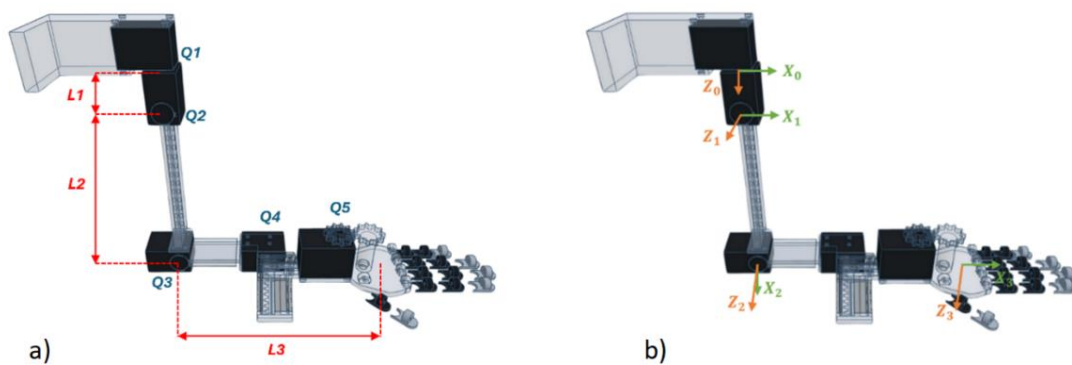


Figura 4.- a) Articulaciones (Q_n) y eslabones (L_n) del brazo robótico. b) Ubicación de los sistemas de coordenadas en el brazo robótico.

Con los sistemas de coordenadas se obtuvo la matriz de transformación homogénea de cada subsistema mediante los siguientes parámetros de Denavit-Hartenberg (Tabla 7):

Tabla 7.- Parámetros de Denavit-Hartenberg.

Subsistema	θ_x	d_x	a_z	α_z
A_1^0	-Q1	L1	0	$\pi/2$
A_2^1	Q2	0	L2	0
A_3^2	Q3	0	L3	0

Al obtener las siguientes matrices de transformación homogénea de cada subsistema:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(-Q1) & 0 & \text{sen}(-Q1) & 0 \\ \text{sen}(-Q1) & 0 & -\cos(-Q1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(Q2) & -\text{sen}(Q2) & 0 & L2 * \cos(Q2) \\ \text{sen}(Q2) & \cos(Q2) & 0 & L2 * \text{sen}(Q2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(Q3) & -\text{sen}(Q3) & 0 & L3 * \cos(Q3) \\ \text{sen}(Q3) & \cos(Q3) & 0 & L3 * \text{sen}(Q3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

se obtuvo la matriz de transformación homogénea resultante A_3^0 de la siguiente manera:

$$A_3^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2$$

En MATLAB al realizar esta operación entre matrices, se obtiene como resultado las coordenadas del efector final que se encuentran en la última columna y las tres primeras filas de la matriz resultante, siendo este el propósito de la cinemática directa.

Para la cinemática inversa se utilizó el método geométrico como se puede observar en la Figura 5 literal a.

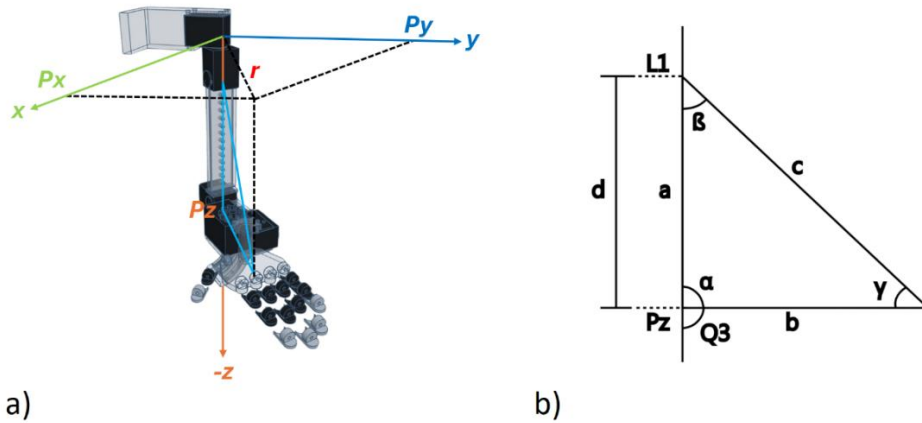


Figura 5.- a) Configuración geométrica para el desarrollo de la cinemática inversa. b) Perspectiva lateral de la configuración geométrica para calcular el valor de $Q3$.

El valor de $Q1$ se obtuvo a partir de la siguiente ecuación trigonométrica:

$$Q1 = -\text{atan} (Py/Px)$$

Para calcular el valor de $Q3$ se toma en cuenta el triángulo rectángulo (color celeste) que se forma en el brazo robótico de la Figura 5 literal a. Para una mejor perspectiva, el análisis geométrico se lo desarrolló como lo muestra la Figura 5 literal b.

Se utilizó la ley de cosenos para encontrar primeramente el ángulo γ de la siguiente manera:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab * \cos (\gamma)$$

Luego se despejó $\cos (\gamma)$:

$$-\cos(\gamma) = \frac{c^2 - a^2 - b^2}{2ab}$$

Posteriormente se sustituyó los valores correspondientes de cada eslabón y del valor c:

$$a= L2$$

$$b= L3$$

$$c= \sqrt{Px^2 + Py^2 + (Pz - L1)^2}$$

Dando la siguiente ecuación:

$$-\cos(\gamma) = \frac{Px^2 + Py^2 + (Pz - L1)^2 - L2^2 - L3^2}{2 * L2 * L3}$$

Sabiendo que $\gamma = 180 - Q3$ y tomando en cuenta la siguiente identidad trigonométrica:

$$\cos(\pi - \theta) = -\cos (\theta)$$

Se tiene que:

$$\cos(180 - Q3) = -\cos(Q3)$$

Por lo tanto, se tiene la siguiente ecuación trigonométrica:

$$\cos(Q3) = \frac{Px^2 + Py^2 + (Pz - L1)^2 - L2^2 - L3^2}{2 * L2 * L3}$$

Después se tomó en cuenta las siguientes identidades trigonométricas:

$$\begin{aligned} \tan(Q3) &= \frac{\text{sen}(Q3)}{\cos(Q3)} \\ \text{sen}^2(Q3) + \cos^2(Q3) &= 1 \end{aligned}$$

Obteniendo que:

$$\begin{aligned} \text{sen}(Q3) &= \sqrt{1 - \cos^2(Q3)} \\ \tan(Q3) &= \frac{\sqrt{1 - \cos^2(Q3)}}{\cos(Q3)} \end{aligned}$$

Dando la solución para Q3:

$$Q3 = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{Px^2 + Py^2 + (Pz - L1)^2 - L2^2 - L3^2}{2 * L2 * L3} \right)^2}}{\frac{Px^2 + Py^2 + (Pz - L1)^2 - L2^2 - L3^2}{2 * L2 * L3}} \right)$$

Ahora se puede obtener el valor de Q2 con la perspectiva de la Figura 6, ya que este depende de Q3.

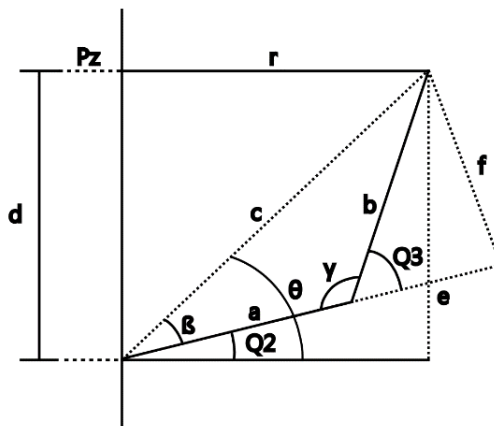


Figura 6.- Perspectiva lateral de L2 y L3 para calcular el valor de Q2.

Para encontrar el valor de $Q2$ se consideró los siguientes valores de la Figura 6:

$$\begin{aligned}d &= Pz - L1 \\e &= L3 * \cos (Q3) \\f &= L3 * \text{sen} (Q3)\end{aligned}$$

Mientras que:

$$Q2 = \theta - \beta$$

Por lo tanto:

$$Q2 = \text{atan} \left(\frac{d}{r} \right) - \text{atan} \left(\frac{f}{L2 + e} \right)$$

Dando la solución para $Q2$:

$$Q2 = \text{atan} \left(\frac{Pz - L1}{\sqrt{Px^2 + Py^2}} \right) - \text{atan} \left(\frac{L3 * \text{sen}(Q3)}{L2 + L3 * \cos (Q3)} \right)$$

Gracias a la cinemática inversa a partir de coordenadas cartesianas se pudo calcular los valores angulares de los tres primeros grados de libertad del brazo robótico y para simularlo en MATLAB se hizo mediante la cinemática directa como lo indica la Figura 7.

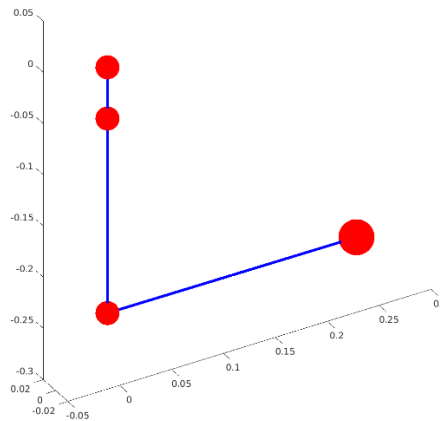


Figura 7.- Simulación del brazo robótico en MATLAB mediante la cinemática directa.

3.7.2.3 Entorno de realidad Virtual.

Para el desarrollo del entorno de realidad virtual se utilizó el motor gráfico Unity en su versión 2022.3.7f1. En el proyecto de Unity se agregaron los paquetes de “Oculus Integration SDK (Legacy)” y “ROS-Sharp”. Con el paquete de Oculus se creó un entorno 3D (Figura 8 literal a) para que sea compatible con las gafas de realidad virtual Meta Quest

2, además, este entorno 3D permite hacer uso del escaneo de manos (Hand Tracking) gracias a las cámaras que poseen las gafas de realidad virtual (Figura 8 literal b). Mediante al escaneo de manos el infante interactúa con los objetos 3D que se encuentran a su alcance, así, el infante puede agarrar la esponja y moverla para realizar la limpieza de la mesa virtual. El fisioterapeuta puede monitorear desde el computador lo que el infante está observando, dándole la posibilidad al primero de dar instrucciones y de agregar más partículas de color verde para que el infante siga limpiando la mesa y a su vez siga incrementando su puntaje tal como se puede observar en la Figura 9.

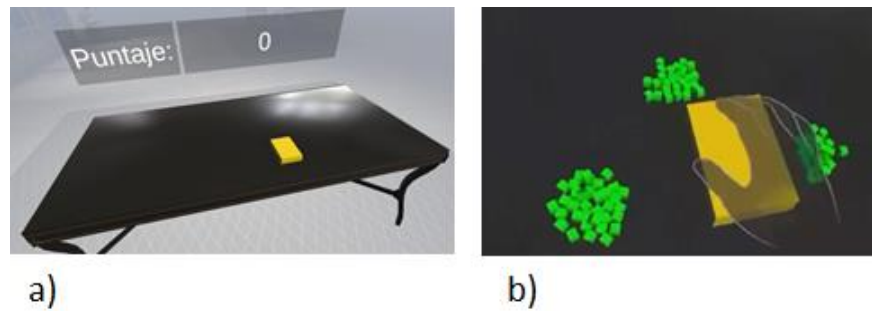


Figura 8.- a) Entorno 3D para la interacción del infante. b) Hand Tracking.



Figura 9.- Interacción del fisioterapeuta con el infante mediante el prototipo de fisioterapia asistida.

El paquete de ROS le permite al entorno de realidad virtual establecer una conexión con el servidor de ROS Bridge mediante el protocolo Web Socket, esto se hace con la finalidad de enviar o publicar un tópico de las coordenadas cartesianas del objeto 3D que es manipulado por el infante. La configuración se muestra en la Figura 10. También se publican otros tópicos que son detallados en la Figura 11.

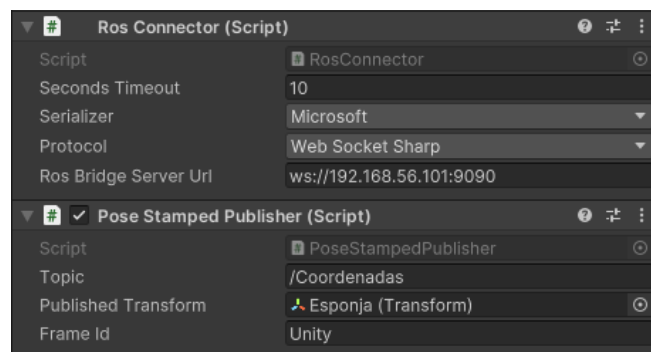


Figura 10.- Configuración para el envío de las coordenadas cartesianas del objeto 3D al servidor de ROS.

3.7.2.4 Combinación de tecnologías.

La Figura 11 muestra la composición del prototipo mediante multicapas, las cuales se clasifican en función a su propósito. La Capa 1 abarca a los sistemas operativos que son utilizados por un computador, teniendo como sistema operativo anfitrión Windows 10 y mediante virtualización se instaló Ubuntu 20.04 como sistema operativo huésped. En la Capa 2 se toma en cuenta el software y hardware de desarrollo detallando que en Windows se instala Unity para crear aplicaciones compatibles con gafas de realidad virtual. En Ubuntu se instaló ROS y MATLAB, los cuales procesan los datos que serán asignados al brazo robótico. En la Capa 3 se detalla un grafo computacional para comprender de mejor manera la arquitectura ROS mediante la publicación y suscripción de tópicos. El entorno de realidad virtual se estableció como un nodo publicador de los tópicos “/Posición_Inicial”, “/Orientación” y “/Coordenadas”. Las coordenadas (x, y, z) corresponden al objeto 3D (esponja) que es manipulado por el infante. El brazo robótico (independientemente en la posición que se encuentre) como nodo suscriptor recibe los primeros valores angulares para cada servomotor mediante el tópico “/Posición_Inicial”. MATLAB al suscribirse a los tópicos “/Orientación” y “/Coordenadas”. Con cinemática inversa procesa los datos y posteriormente los publica con los tópicos “/Orientación_Mano” y “/Valores_Angulares”. El brazo robótico se suscribe a estos dos últimos tópicos para ser teleoperado desde el entorno de realidad virtual. Gracias a que ROS permite la instalación de diferentes servicios, en la Capa 4 se detalla el servicio Rosbridge para que el entorno de realidad virtual pueda conectarse a ROS y este pueda publicar los tópicos anteriormente mencionados, dando como resultado final el servicio de la Capa 5.

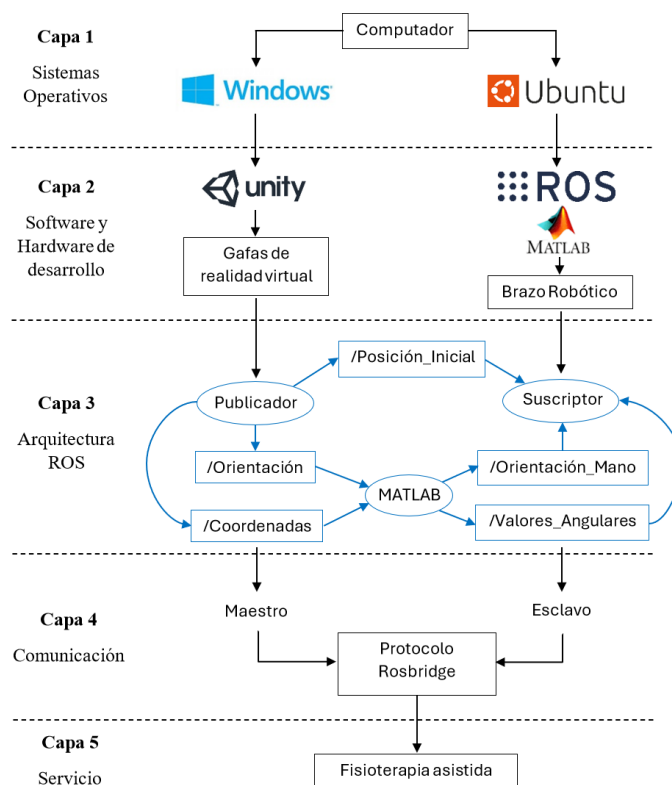


Figura 11.- Diagrama “Multicapas” del prototipo de fisioterapia asistida.

3.7.2.5 Estructura de reposo.

Se construyó una estructura para que el infante repose en ella. En esta estructura se ancla el brazo robótico, el cual se acopla en el miembro superior izquierdo del infante (Figura 12). El brazo robótico puede ser movido, mediante un sistema de rieles, de manera vertical para ajustarse a las diferentes estaturas de los infantes.

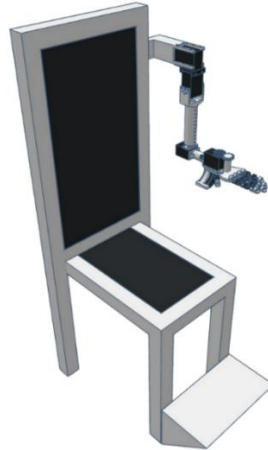


Figura 12.- Estructura de reposo.

3.7.2.6 Obtención de datos.

Para obtener los datos que corresponden a las variables dependientes se realizaron pruebas tomando en cuenta la variable independiente, esto quiere decir que los infantes limpiaron una mesa con pizarra utilizando el miembro superior izquierdo (Figura 13 literal a) y limpiaron la mesa del entorno virtual con el miembro superior derecho (Figura 13 literal b). En ambos escenarios se midió el tiempo con un cronómetro para determinar cuánto se demoran en completar la tarea asignada.

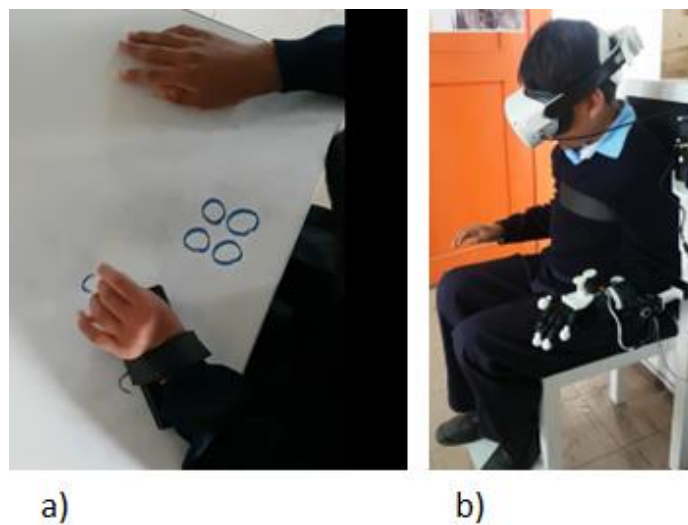


Figura 13.- a) Limpieza de la mesa (Fisioterapia tradicional). b) Limpieza de la mesa (Prototipo).

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Resultados

En la Tabla 8 se detalla la media de los tiempos (en segundos) de cada día que fueron obtenidos en la Unidad Educativa Especializada “Carlos Garbay Montesdeoca”. Estos tiempos reflejan cuanto se demoraron los infantes en completar la tarea asignada mediante la fisioterapia tradicional (FT) y con el prototipo (Pro).

Tabla 8.- Media de los tiempos por día de la actividad “limpiar la mesa” de cada infante.

Días	Infante 1		Infante 2		Infante 3	
	FT (s)	Pro (s)	FT (s)	Pro (s)	FT (s)	Pro (s)
Día 1	25.81	10.78	46.4	94.21	61.49	14.24
Día 2	31.51	11.92	23.28	85.42	62.96	7.23
Día 3	33.24	17.43	20.89	12.84	50.56	12.605
Día 4	22.96	12.96	27.01	52.44	50.2	9.22
Día 5	37.82	9.13	30.23	8.33	56.67	20.27
Día 6	26.13	9.45	33.06	8.64	58.67	7.90
Día 7	19.06	12.71	32.81	22.83	39.49	10.43
Día 8	20.82	12.28	12.97	24.96	48.05	10.99
Día 9	19.39	15.41	12.23	18.06	49.46	11.19
Día 10	15.47	10.14	29.67	5.14	47.83	7.91
Día 11	15.19	11.99	20.48	18.28	49.37	11.12
Día 12	13.58	12.97	21.35	10.41	38.35	9.12
Día 13	12.92	9.78	20.44	12.99	31.38	7.36
Día 14	16.71	7.46	27.27	5.1	23.35	7.72
Día 15	14.29	10.01	19.06	4.92	33.9	6.27
Día 16	12.01	9.03	12.88	5.95	15.57	7
Día 17	17.97	7.99	26.23	5.05	23.23	15.13
Día 18	11.05	9.5	20.15	6.03	26.68	8.65
Día 19	15.96	11.1	16.60	5.08	22.03	9.37

Todos los datos obtenidos en esta investigación son representados gráficamente en la Figura 14.

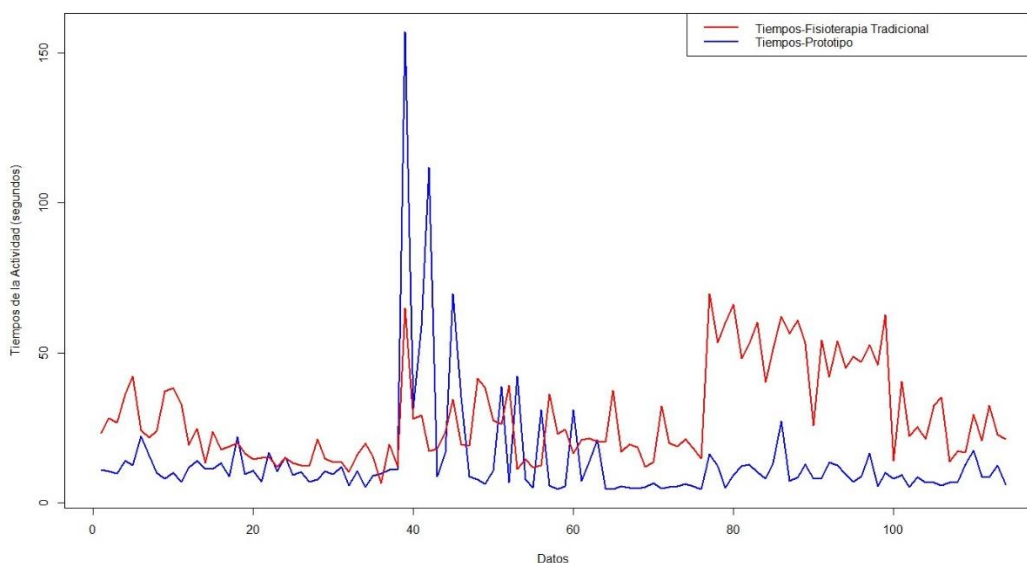


Figura 14.- Tiempos obtenidos con la fisioterapia tradicional y con el prototipo

En la Tabla 9 se detalla el análisis descriptivo del conjunto de datos, donde se puede ver claramente que existe una diferencia significativa entre las medias de ambas muestras.

Tabla 9.- Análisis Descriptivo de las muestras de fisioterapia tradicional y del Prototipo de fisioterapia asistida.

Muestras	Resultados Descriptivos	
Fisioterapia Tradicional	Media	28.49535
	Mínimo	6.53
	Cuartil 1	16.9425
	Cuartil 2 (Mediana)	22.585
	Cuartil 3	38.14
	Máximo	69.65
	Rango	63.12
	Rango Intercuartil	21.1975
	Varianza	239.1503
	Desviación Estándar	15.46448
Prototipo de fisioterapia asistida	Media	14.25614
	Mínimo	4.56
	Cuartil 1	6.9525
	Cuartil 2 (Mediana)	9.505
	Cuartil 3	12.81
	Máximo	156.98
	Rango	152.42
	Rango Intercuartil	5.8575
	Varianza	367.7866
	Desviación Estándar	19.17776

Al tener una cantidad mayor de 50 datos (en cada una de las muestras), se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov. La diferencia que existe entre ambas muestras fue analizada para comprobar si cumple con una distribución normal, obteniendo un valor p de 0.009514 (Figura 15).

```

Asymptotic one-sample kolmogorov-smirnov test
data: Diferencia
D = 0.15316, p-value = 0.009514
alternative hypothesis: two-sided

```

Figura 15.- Resultado de la prueba de Kolmogórov-Smirnov obtenido con RStudio.

El valor p al ser menor que el nivel de significancia se concluyó que los datos no siguen una distribución normal, esto quiere decir que los datos siguen un enfoque no paramétrico, y para hacer una comparación entre las muestras definidas se optó por realizar una prueba de Wilcoxon. La prueba de Wilcoxon dio como resultado un valor p de 2.2e-16 (Figura 16), concluyendo que se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa.

```
wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: tiempo by grupo
w = 1580, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true location shift is less than 0
```

Figura 16.- Resultado de la prueba de Wilcoxon obtenido con RStudio.

4.2 Discusión

Como se puede observar en la Figura 17, la tendencia central (Mediana) de la muestra “Fisioterapia Tradicional” es mayor que la muestra “Prototipo”, determinando que existen diferencias significativas entre los tiempos de ambas muestras. Esto se resume en que los infantes culminan la actividad asignada en menos tiempo con el prototipo, dando más validez a la hipótesis alternativa.

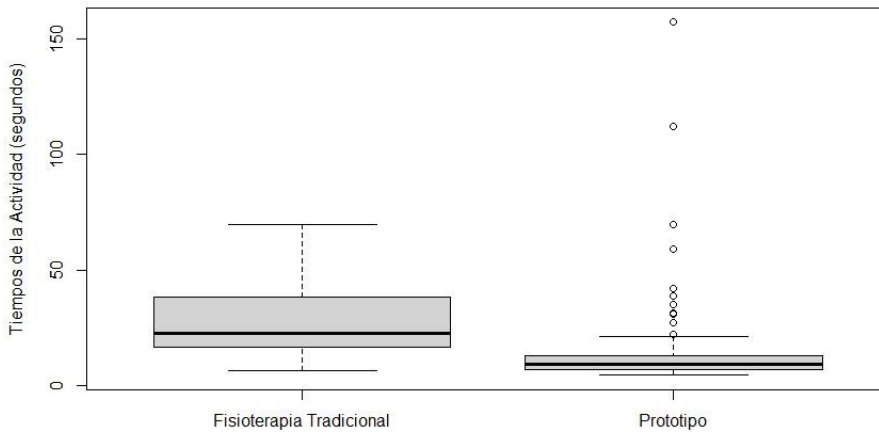


Figura 17.- Distribución de datos de las muestras.

A pesar de que en la Figura 17 se puede observar que existe una diferencia significativa entre ambas muestras, la muestra “Prototipo” es la que más valores atípicos presenta. Los valores atípicos corresponden a los datos que fueron recolectados con el Infante 2, esto quiere decir que el infante tenía problemas o dificultades para interactuar con el entorno de realidad virtual. Los tiempos que consiguieron a lo largo de 19 días cada uno de los infantes con el prototipo, se puede observar de forma gráfica en la Figura 18.

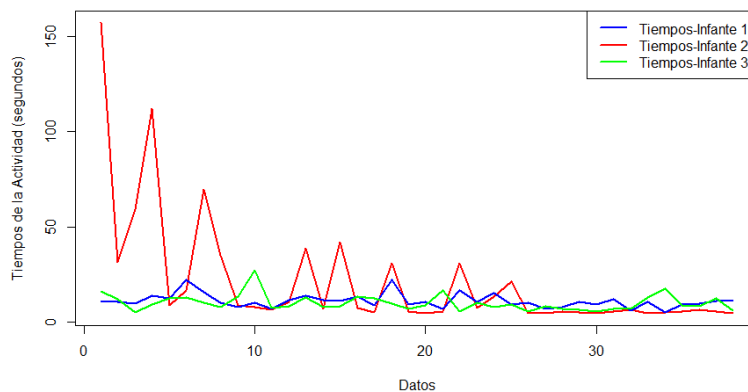


Figura 18.- Tiempos de los infantes al realizar la actividad con el prototipo.

El Infante 2 mejora notoriamente los tiempos de ejecución de la actividad dentro del entorno de realidad virtual, y para corroborar esta afirmación se realizó una prueba de Mann-Kendall. El valor p y el valor estadístico S de la prueba de Mann-Kendall se detallan en la Tabla 10 al igual que los porcentajes de mejora que obtuvieron los infantes dentro del entorno de realidad virtual.

Tabla 10.- Valor p, valor estadístico S de la prueba Mann-Kendall y porcentaje de mejora en los tiempos de cada infante para interactuar con el entorno de realidad virtual.

Pacientes	Valor p	Valor estadístico S	Porcentaje de mejora
Infante 1	0.07219	-144	-0.63 %
Infante 2	4.198e-06	-367	97.03 %
Infante 3	0.08048	-140	22.54 %

Como se puede observar en la Tabla 10, los valores estadísticos S son negativos, esto quiere decir que en los tres casos hay una tendencia decreciente, pero solo en el caso del Infante 2 al obtener un valor p de 4.198e-06 y este al ser menor que el nivel de significancia, se puede concluir que existe una tendencia decreciente significativa, reflejando un porcentaje de mejora sustancial. Las líneas de tendencia decreciente se puede observar de forma gráfica en la Figura 19.

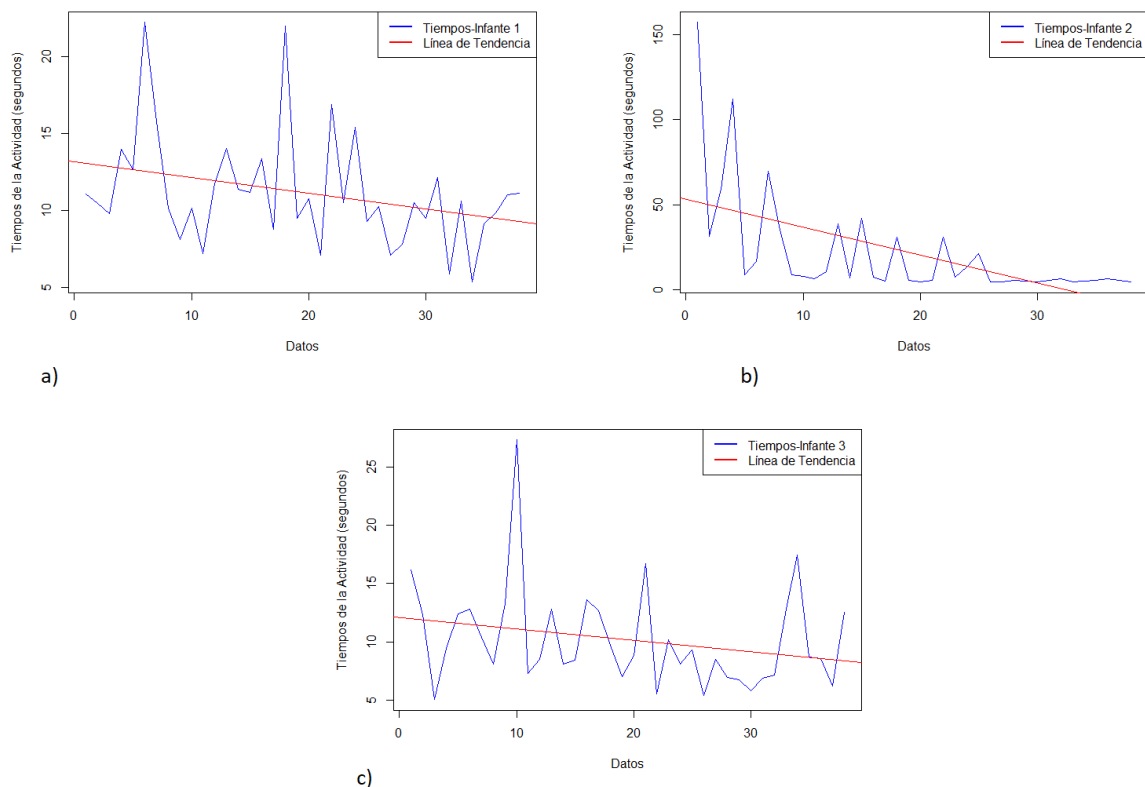


Figura 19.- a) Línea de tendencia decreciente para los tiempos con el prototipo en el Infante 1. b) Línea de tendencia decreciente para los tiempos con el prototipo en el Infante 2. c) Línea de tendencia decreciente para los tiempos con el prototipo en el Infante 3.

Analizando los tiempos que obtuvieron cada uno de los infantes con la fisioterapia tradicional mediante una prueba de Mann-Kendall, el valor p y el valor estadístico S se detallan en la Tabla 11 al igual que los porcentajes de mejora que obtuvieron los infantes.

Tabla 11.- Valor p, valor estadístico S de la prueba Mann-Kendall y porcentaje de mejora en los tiempos de cada infante con la fisioterapia tradicional.

Pacientes	Valor p	Valor estadístico S	Porcentaje de mejora
Infante 1	1.567e-06	-383	47.34 %
Infante 2	0.02523	-179	77.11 %
Infante 3	5.626e-07	-399	69.54 %

Como se puede observar en la Tabla 11, los valores estadísticos S son negativos, esto quiere decir que en los tres casos hay una tendencia decreciente, y los valores p son menores que el nivel de significancia, concluyendo de que existe una tendencia decreciente significativa en los tres casos, reflejando un porcentaje de mejora sustancial. Las líneas de tendencia decreciente se puede observar de forma gráfica en la Figura 20.

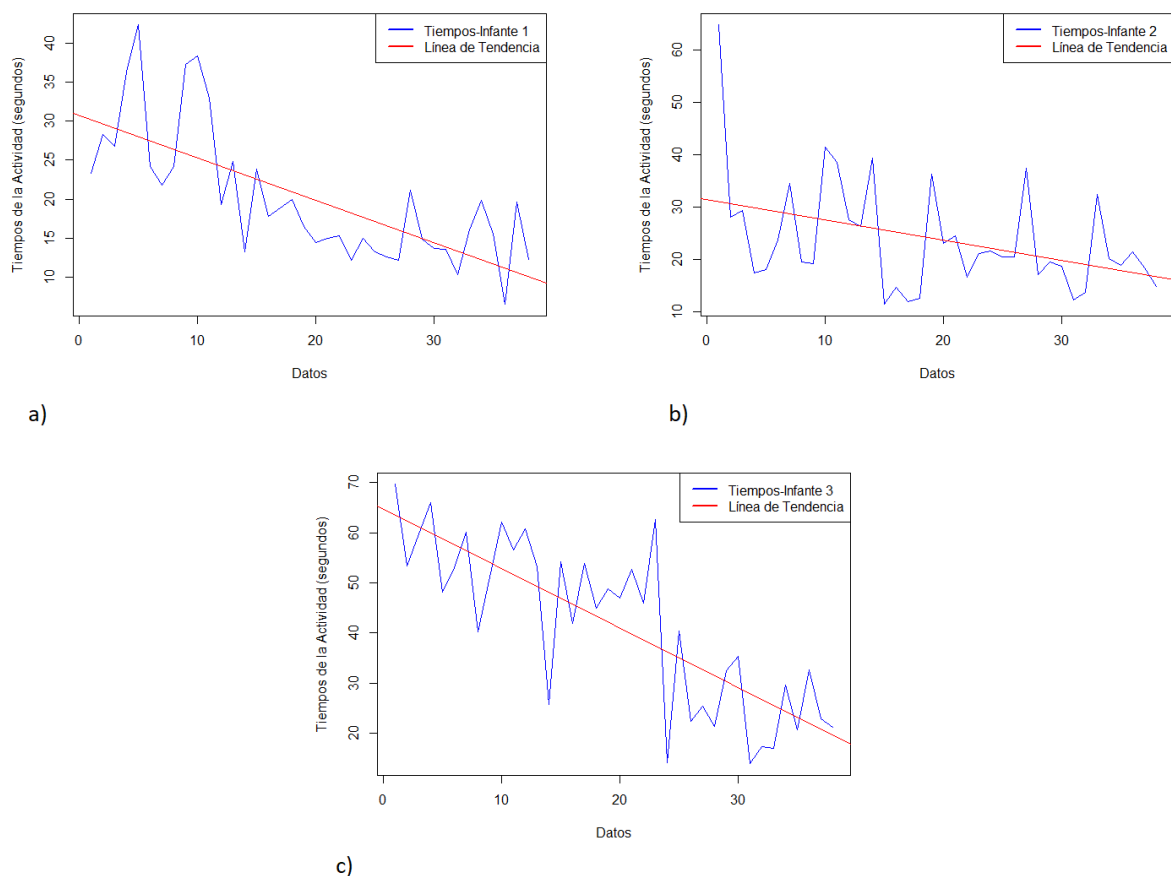


Figura 20.- a) Línea de tendencia decreciente para los tiempos de la terapia tradicional en el Infante 1. b) Línea de tendencia decreciente para los tiempos de la terapia tradicional en el Infante 2. c) Línea de tendencia decreciente para los tiempos de la terapia tradicional en el Infante 3.

Al observar que con el prototipo se reducen los tiempos de actividad, se calculó el nivel de eficiencia utilizando la media de cada muestra. Los resultados se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12.- Nivel de eficiencia del prototipo.

Media-Fisioterapia Tradicional	Media-Prototipo	Nivel de eficiencia
28.49 segundos	14.25 segundos	49.98 %

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

- Fue de gran ayuda realizar la simulación del brazo robótico en MATLAB para identificar el área de trabajo del infante dentro del entorno de realidad virtual. Si se publica (mediante ROS) una coordenada cartesiana que no se encuentre dentro de dicha área, los cálculos pueden brindar resultados no favorables para los servomotores DYNAMIXEL, causando que el brazo robótico adopte una posición perjudicial para el miembro superior izquierdo del infante.
- Para el motor gráfico Unity existen múltiples formas o herramientas que permiten crear proyectos que estén orientados a la realidad virtual, siendo el SDK de Oculus, el más fácil de implementar, ya que en este paquete hay “mini proyectos” que pueden ser ejecutados directamente en las gafas de realidad virtual, facilitando el desarrollo de un nuevo proyecto de realidad virtual.
- El protocolo de Rosbridge al soportar conexiones a través de WebSocket, puede establecer una comunicación casi en tiempo real, ya que el intercambio de información entre el entorno de realidad virtual y ROS es bidireccional, dando acceso a los datos de una manera más rápida, siendo esta configuración de conexión la más favorable para la teleoperación del brazo robótico.
- Los servomotores DYNAMIXEL cuando trabajan con una velocidad de transferencia de 9600 bps, no funcionan correctamente, debido a que se saturan al recibir los valores angulares de los tópicos de MATLAB. Siendo así, la velocidad de transferencia de 4 Mbps la mejor opción para que los servomotores funcionen correctamente.
- Los infantes con hemiplejía izquierda recibieron una fisioterapia de tipo espejo con el prototipo, ya que el brazo robótico replica el movimiento del miembro superior derecho.
- El Infante 2 tenía problemas para interactuar con el entorno de realidad virtual debido a su trastorno ocular exotropía, causándole dificultades para agarrar correctamente el objeto 3D.
- A lo largo de este estudio se constató un gran interés por parte de los infantes en utilizar la tecnología como parte de sus sesiones fisioterapéuticas. Cabe señalar también que los infantes se sintieron competitivos entre ellos, motivándolos a obtener la mayor puntuación posible dentro del entorno de realidad virtual. Los infantes tampoco descartan seguir trabajando mediante la fisioterapia tradicional.
- El prototipo de fisioterapia asistida al tener un nivel de eficiencia del 49.98%, indica que es capaz de completar la tarea asignada en casi la mitad del tiempo requerido por la fisioterapia tradicional.
- Combinar la fisioterapia tradicional con el prototipo de fisioterapia asistida en las sesiones de terapia de los infantes, causó una mejora en su técnica de limpieza, utilizando únicamente el miembro superior izquierdo.

5.2 Recomendaciones

- Utilizar el SDK de DINAMIXEL para programar los servomotores de manera fácil.
- Integrar en el brazo robótico articulaciones de tipo rotula para tener más grados de libertad en el hombro.
- Crear más ejercicios de la vida diaria dentro del entorno de realidad virtual y considerar el desarrollo de ejercicios para pacientes con estrabismo.
- Mejorar la capacidad del prototipo enfocándose en la motricidad fina del paciente.
- Realizar estudios sobre la implementación de tecnologías en los miembros inferiores del paciente.
- Desarrollar una aplicación ejecutable que integre la arquitectura de ROS para establecer la comunicación entre el brazo robótico y el entorno de realidad virtual de forma automática.
- Crear un mejor diseño del brazo robótico que pueda acoplarse correctamente a la mano del paciente sin importar el porcentaje de discapacidad.
- Evitar la virtualización de sistemas operativos y utilizar tarjetas de desarrollo de categoría industrial como la BeagleBone Black o Blue para la ejecución del servidor de ROS.
- Utilizar mejores materiales para la construcción del brazo robótico, evitando los materiales convencionales que se utiliza en las impresoras 3D.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] G. I. Aguirre Izurieta, "Facilitación Neuromuscular Propioceptiva en Hemiplejía", Tesis de Grado, Dept. TFD, UNACH, Riobamba, Ecuador, 2019. [En línea]. Disponible: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6302>
- [2] R. Bornacelli Durán, "Robótica aplicada a terapias de rehabilitación. Estudio comparativo de dos técnicas de sensado para exoesqueletos asistidos usados en la recuperación de pacientes que han sufrido accidentes cerebrovasculares", Tesis de Maestría, Dept. IEE, UNINORTE, Barranquilla, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10584/10348>
- [3] L. De la Cruz Barboza, "Concepto y definición de Sistemas Operativos, historia de los Sistemas Operativos, características de los Sistemas Operativos, clasificación de los sistemas operativos, Aplicaciones", Monografía, Dept. EPMI, UNE, Lima, Perú, 2018. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/4588>
- [4] R. Suárez *et al.*, "Robot Operating System (ROS)", AER Automation, Barcelona, Versión 2.10.1, marzo de 2022. Accedido el 17 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: https://www.aer-automation.com/wp-content/uploads/2022/03/ROS_articuloAER.pdf
- [5] F. Tabash Pérez y A. M. Sandoval Poveda, "La realidad virtual (RV) es una opción innovadora", *Revista Innovaciones Educativas*, vol. 23, n.º 0, 2021. Accedido el 17 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/428/4282629010/>
- [6] C. Yang *et al.*, "Extended Reality Application Framework for a Digital-Twin-Based Smart Crane," *Appl. Sci.*, vol. 12, n.º 12, junio de 2022. Accedido el 17 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/app12126030>
- [7] V. Heredia, "Accidentes cerebrovasculares, con más muertes en dos años". El Comercio, <https://www.elcomercio.com/actualidad/acv-registraron-exceso-muertes-dos-anos-ecuador.html> (accedido el 17 de junio de 2023).
- [8] CONADIS, "Estadísticas de Discapacidad - Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades". Consejo Nacional para la igualdad de Discapacidades - CONADIS, <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/> (accedido el 17 de junio de 2023).
- [9] M. A. Jiménez León y V. P. Maridueña Arciniegas, "Efectividad del tratamiento intensivo de rehabilitación en pacientes hemipléjicos posterior a un accidente cerebrovascular", *Revista Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación*, vol. 31, n.º 2, enero de 2022. Accedido el 17 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.28957/rcmfr.v31n2a2>
- [10] B. M. González Suntaxi, "Terapia de espejo en la rehabilitación funcional de miembros superiores en pacientes con accidente cerebrovascular", Tesis de Grado, Dept. TO, UCE, Quito, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/25522>




- [11] D. Anaïs, "Eficacia de un tratamiento con realidad virtual (Nintendo® Wii™) en la funcionalidad de la extremidad superior en niños con parálisis cerebral hemipléjica espástica, con edades entre 7 a 12 años", Tesis de Grado, Dept. F, UMANRESA, Barcelona, España, 2021. [En línea]. Disponible: <http://repositori.umanresa.cat/1/936>
- [12] S. N. Bastidas Barahona, "Beneficios de la realidad virtual para promover la independencia de las actividades básicas de la vida diaria en usuarios con hemiplejía", Tesis de Grado, Dept. TO, UCE, Quito, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/27123>
- [13] D. Yamada-Rice *et al*, "Children and Virtual Reality: Emerging Possibilities and Challenges - RCA Research Repository." [En línea]. Disponible: <http://researchonline.rca.ac.uk/id/eprint/3553>
- [14] M. A. Romero Morales, "Investigación bibliográfica de terapia robótica en hemiplejía", Tesis de Grado, Dept. TF, UCE, Quito, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/23752>
- [15] R. Díaz Monterde, "Desarrollo de interfaz con realidad aumentada para mejorar la interacción en la locomoción con exoesqueletos robóticos", Tesis de Maestría, Dept. U-TAD, UCJC, Madrid, España, 2020. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10261/230451>
- [16] M. Tovar Martínez, "Interfaz inmersiva de realidad virtual para la teleoperación de robots móviles", Tesis de Grado, Dept. CCIA, UA, Alicante, España, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10045/116749>
- [17] N. Fuentes Gonzáles y A. V. Pirazán Vergara, "Percepción del accidente cerebrovascular en pacientes con enfermedad crónica no transmisible", *Revista Ciencia y Cuidado - Scientific Journal of Nursing*, vol. 19, n° 3, diciembre de 2022. Accedido el 18 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/cienciaycuidado/article/view/3477>
- [18] H. R. Serrano Villota, "Fisiopatogenia de la Hemiplejía en adultos. Un análisis fisioterapéutico", Tesis de Grado, Dept. TFD, UNACH, Riobamba, Ecuador, 2019. [En línea]. Disponible: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6354>
- [19] I. L. Cárdenas Maticorena, "Efectos de la terapia de restricción en la función motora del miembro superior en las actividades de la vida diaria del niño con hemiplejía espástica, en una clínica de Cusco, 2021", Tesis de Grado, Dept. EAPTM, UWIENER, Cusco, Perú, 2022. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.13053/8092>
- [20] M. Paredes Tenepaguay, "Evaluación e intervención del neurodesarrollo en infantes con parálisis cerebral del Centro NEDI", Tesis de Maestría, Dept. P, UDA, Cuenca, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12548>
- [21] J. P. Acero Checa, "Beneficio de la terapia espejo en niños con hemiplejía en edades comprendidas entre 1 y 12 años para mejorar el movimiento voluntario de la mano afectada en el Centro de Rehabilitacion Integral de Especialidades N°4 de la ciudad de Ibarra en el periodo noviembre 2017-abril 2018", Tesis de Grado, Dept. TO, UCE,

- Quito, Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15464>
- [22] R. Avello, J. Lavonen y M. Zapata-Ros, "Coding and educational robotics and their relationship with computational and creative thinking. A compressive review", *Revista de Educación Distancia (RED)*, vol. 20, n.º 63, abril de 2020. Accedido el 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.6018/red.413021>
- [23] M. García Núñez, "Reeducación de la marcha en pacientes postictus mediante asistencia robótica vs. fisioterapia convencional: una revisión bibliográfica", Tesis de Grado, Dept. F, UDC, La Coruña, España, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/2183/28839>
- [24] D. Tena Frutos y M. Nandayapa, "Metodología de interacción humano robot para el control de exoesqueletos robóticos de asistencia", *Revista Memorias de Ciencia y Tecnología*, vol. 1, n.º 2, noviembre de 2021, Accedido el 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/memoriascyt/article/view/4792>
- [25] "Harmonic Bionics | Leading the Future of Rehabilitation Robotics". Harmonic Bionics. Accedido el 9 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://harmonicbionics.com/>
- [26] J. D. Ramírez Zamora, O. A. Domínguez Ramírez, G. Sepúlveda Cervantes, L. E. Ramos Velasco y A. Jarillo Silva, "Interfaz háptica adaptable para neurorrehabilitación y fisioterapia asistida en miembro superior", *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, Especial3, agosto de 2022. Accedido el 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial3.8936>
- [27] K. Kashana, "Evaluación de la espasticidad mediante robots colaborativos y sistemas MOCAP", Tesis de Grado, Dept. ISA, UC3M, Madrid, España, 2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10016/30489>
- [28] M. Hernández Ordoñez, M. B. Ortiz Moctezuma, C. A. Calles Arriaga y J. C. Rodríguez Portillo, *Robótica: Análisis, modelado, control e implementación*, OmniaScience, 2015. Accedido el 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3926/oss.18>
- [29] Dirección de Educación Técnica. Morfología Básica de un Robot Industrial. (2020). Accedido el 19 de junio de 2023. [Imagen]. Disponible: <https://docplayer.es/200506151-Morfologia-basica-de-un-robot-industrial.html>
- [30] R. Miranda Colorado, *Cinemática y Dinámica de Robots Manipuladores*, 1ª ed. Ciudad de México, Alfaomega, 2016.
- [31] J. S. Piratova Silva, "Control y operación de un brazo robótico virtual mediante Robot Operating System (ROS)", Proyecto de grado, Dept. IE, UAN, Bogotá, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/3091>
- [32] R. M. Midence Saucedo, "Diseño de modelo matemático mediante el algoritmo Denavit-Hartenberg para un robot de 7-GdL en la industria", Tesis de Grado. Dept.

- IM, UNITEC, Tegucigalpa, Honduras, 2021. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unitec.edu/xmlui/handle/123456789/9649>
- [33] J. A. Márquez Patiño, "Metodos para resolver cinematica inversa", INSTITUTO TECNOLOGICO SUPERIOR DE TEZIUTLAN, Teziutlán, 227428341.
- [34] S. Arévalo Fernández, "Aplicación de Simulink y MATLAB para análisis cinemático y dinámico, control y comunicaciones de robots industriales", Tesis de Grado, Dept. ISA, UVA, Valladolid, España, 2020. [En línea]. Disponible: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47727>
- [35] M. Cashmore *et al.*, "ROSPlan: Planning in the Robot Operating System", *Proc. Int Conf. Automated Planing Scheduling*, vol. 25, abril de 2015. Accedido el 19 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13699>
- [36] D. Mulero Pérez, "Interacción con objetos en Realidad Virtual utilizando tracking de manos", Tesis de Grado, Dept. IM, UA, Alicante, España, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10045/115937>
- [37] G. Gómez Martínez, "Ant"s scape: Videojuego realizado con Unity", Tesis de Grado, Dept. II, UOC, Barcelona, España, 2021. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10609/125747>
- [38] Metaverso Flow, "Meta Quest 2 (Las mejores gafas VR) - Revisión Completa". MetaversoFlow. <https://metaversoflow.com/meta-quest-2/> (accedido el 19 de junio de 2023).
- [39] "ROBOTIS e-Manual". ROBOTIS e-Manual. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106/>.
- [40] "ROBOTIS e-Manual". ROBOTIS e-Manual. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xm430-w350/>.
- [41] "ROBOTIS e-Manual". ROBOTIS e-Manual. Accedido el 19 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/openmanipulator_x/quick_start_guide/#communication-interface.

ANEXOS.

Tabla 13.- Porcentaje de discapacidad y edad de los pacientes.

Paciente	Porcentaje de discapacidad	Edad
<p>Infante 1</p> 	25 %	11 años
<p>Infante 2</p> 	56 %	9 años
<p>Infante 3</p> 	82 %	10 años



CERTIFICACIÓN

La Suscrita Mgtr. Lorena Elizabeth Coronel Montesdeoca, Rectora de la Unidad Educativa Especializada "Carlos Garbay Montesdeoca" de la ciudad de Riobamba, a petición verbal de la parte interesada.

CERTIFICA

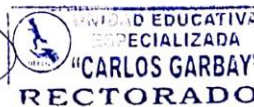
Que la Señor **MARIÑO GUERRÓN BYRON ANDRÉS**, portador de la cédula de Identidad N° 1753511490, estudiante de la Universidad Nacional de Chimborazo Facultad de Ingeniería, carrera de Electrónica y Telecomunicaciones ha realizado las pruebas para el proceso de Titulación en la Institución, conforme al detalle que se señala a continuación:

Tipo de práctica	Proceso de Titulación	Período académico	2023 2S
Fecha Inicio	08 de enero de 2024	Docente Tutor(a) de la Institución receptora	Mgtr. Francisco Vallejo
Fecha fin	26 de febrero de 2024	Área/Asignatura	Terapia Ocupacional
Total de horas cumplidas	47	Nivel	
		Inicial	
		Básica	X
		Bachillerato	

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al señor hacer uso del presente documento como a bien tuviere.

Riobamba, 04 de marzo de 2024


 Lic. Lorena Coronel Mgtr.
RECTORA



Correo: institutocarlosgarbay@yahoo.es

Figura 21.- Certificado emitido por la Unidad Educativa Especializada "Carlos Garbay Montesdeoca" Riobamba - Ecuador.