



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÁPTICO PARA REHABILITACIÓN ACTIVA DE MUÑECA EN EL CONSULTORIO “HUELLAS FISIOTERAPIA”

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

COBOS CEVALLOS CRISTHIAN PATRICIO

cristhian.cobos@epn.edu.ec

GUAYTA TORRES JENNIFER CAROLINA

Jennifer.guayta@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. JORGE ANDRÉS ROSALES ACOSTA

andres.rosales@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Cristhian Patricio Cobos Cevallos y Jennifer Carolina Guayta Torres, bajo mi supervisión.

NOMBRE DIRECTOR

Dr. JORGE ANDRÉS ROSALES ACOSTA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Cristhian Patricio Cobos Cevallos y Jennifer Carolina Guayta Torres, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Cristhian Patricio Cobos Cevallos

Jennifer Carolina Guayta Torres

DEDICATORIA

A mis amados padres Sandra Cevallos e Ivan Cobos, que, a pesar de la distancia física, siempre han estado a mi lado apoyándome, aconsejándome y guiándome en cada paso que doy.

A mi hermana Liseth Cobos y mi abuelita Rosa Torres por ser mi compañía y mi motor para seguir adelante cada día.

A todos esos verdaderos amigos y familiares con los que he compartido y aprendido tanto en estos maravillosos años.

Cristhian Patricio Cobos Cevallos

DEDICATORIA

A mis padres Rocio Torres y Juan Guayta, por brindarme su apoyo incondicional, sus consejos, su confianza y el sustento económico durante toda mi vida.

A mis hermanas Evelin y Analia por ser la motivación de mi vida y demostrarme cada día un mundo lleno de alegría y amor.

A mis tías Mirtha Torres y Sara Torres por guiarme y aconsejarme siendo en mi corazón mis hermanas mayores.

Jennifer Carolina Guayta Torres

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quisiera agradecer a la Escuela Politécnica Nacional y a todos sus docentes e integrantes. Gracias por haberme permitido formarme en tan prestigiosa institución.

A mi director de tesis, Dr. Andrés Rosales por toda su ayuda y apoyo en este proceso de culminación de mi carrera universitaria. Gracias por todo su esfuerzo, paciencia y motivación a lo largo de este proyecto.

También quiero agradecer a todos los docentes que a lo largo de mi carrera universitaria han aportado a mi formación tanto humana como profesional, y en especial a la docente MSc. María Fernanda Trujillo por su ayuda, consejos, apoyo y dedicación en la elaboración de este proyecto de titulación, pero sobre todo quisiera agradecerle por su amistad y su confianza.

Agradezco también a mi familia, especialmente a mis padres que a pesar de vivir en otro país han hecho el inmenso esfuerzo de estar presentes este día tan especial, este logro también es de ustedes. Además, quisiera agradecer a mi hermana y abuelita materna por ser mi soporte y motivación para continuar cada día, sin ustedes esto no habría sido posible.

De igual manera quisiera agradecer a mi compañera de proyecto y mejor amiga Jennifer Guayta, las páginas de este trabajo se me harían cortas para expresar toda la gratitud que siento hacia ti. Tu apoyo, motivación y consejos durante ya más de 8 años de conocernos han sido un pilar fundamental en mi formación personal. Muchas gracias por todos los momentos vividos a lo largo de estos años y muchas gracias por todos los momentos que están por venir.

Finalmente, quisiera agradecer a todas aquellas personas que han formado parte de mi vida durante todos estos años universitarios, muchas gracias por todas las experiencias vividas y momentos compartidos, espero que este no sea más que el comienzo de una larga amistad.

Cristhian Patricio Cobos Cevallos

AGRADECIMIENTO

Son muchas las personas que han contribuido en la culminación de este trabajo de titulación y de mi carrera universitaria. Por este medio quiero expresarles mis agradecimientos debido a que sin ustedes esta meta no se habría hecho realidad.

Lo máspreciado en mi mundo es mi familia, por ello quiero agradecer desde el fondo de mi corazón a mis padres por su apoyo incondicional, por motivarme cada día y por siempre creer en mí. Gracias Papis, este logró es para ustedes. Igualmente quiero agradecer a mis hermanas que siempre logran hacerme sonreír y son mi mayor fuente de inspiración.

Agradezco a mis abuelitos, tíos, tías y primas por todos sus consejos, palabras de aliento, apoyo. Gracias por esta pendiente de mí.

Gracias a la Escuela Politécnica Nacional que me acogió en su seno durante este tiempo, gracias a todos los docentes que han sido parte de esta etapa de mi vida, gracias por sus enseñanzas, por el conocimiento y las experiencias de vida que me han brindado.

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Andrés Rosales por su ayuda, consejos y guía en la realización de este proyecto, también quiero expresar mis agradecimientos a la MSc. María Fernanda Trujillo no solo por su ayuda sino por su apoyo y su confianza a lo largo de la realización de este proyecto.

Gracias a Cristhian Cobos por ser un apoyo incondicional durante tantos años, gracias por ser mi mano derecha, mi compañero de alegrías, penurias y aventuras. Sé que esta travesía no fue fácil, ni sencilla y aunque algunas veces llegue a flaquear siempre estuviste conmigo siendo esa fuerza que me motivaba a continuar. Gracias por brindarme una amistad tan pura y sincera, por eso y mucho más mil gracias.

Por último, pero no menos importante quiero agradecer a mis amigos, muchas gracias por los momentos vividos, las risas compartidas y la camaradería que me han brindado a lo largo de los años. Ustedes me han enseñado lecciones de vida y los llevo en un lugar muy especial de mi corazón.

Jennifer Carolina Guayta Torres

Contenido

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO	4
1.3.1 FISIOLÓGÍA MUSCULAR	4
1.3.2 PATOLOGÍAS.....	8
1.3.3 EJERCICIOS MOTRICES	12
1.3.4 SISTEMA DE REHABILITACIÓN	17
2. METODOLOGÍA.....	26
2.1 HARDWARE	26
2.1.1 DISPOSITIVO HÁPTICO	26
2.1.2 DISEÑO E IMPRESIÓN DE PIEZAS 3D	27
2.2 COMUNICACIÓN.....	30
2.2.1 LIBRERÍA DINÁMICA	32
2.2.2 APLICACIÓN FALCON SERVER.....	33
2.2.3 ENLACE A UNITY	34
2.2.4 DESARROLLO DE LOS EJERCICIOS MOTRICES	35
2.2.5 DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS	67
2.2.6 INTERFAZ DE USUARIO	69
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
3.1 HARDWARE	74
3.1.1 VALIDACIÓN DEL EJE DE PRENSIÓN FINA.....	74
3.1.2 VALIDACIÓN DEL SOPORTE DEL ANTEBRAZO	75
3.2 COMUNICACIÓN.....	75
3.2.1 VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN FALCON SERVER Y LA LIBRERÍA DINÁMICA	75
3.2.2 VALIDACIÓN DE LA COMUNICACIÓN DEL SISTEMA.....	76

3.3 SOFTWARE.....	79
3.3.1 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LA MALLA.....	79
3.3.2 PRUEBAS DE LA BASE DE DATOS.....	80
3.4.1 ANÁLISIS DE LOS REGISTROS HISTÓRICOS	84
3.4.2 ENCUESTAS Y COMENTARIOS	88
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
4.1 CONCLUSIONES	91
4.2 RECOMENDACIONES	92
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

RESUMEN

En la actualidad, la implementación de sistemas de rehabilitación robóticos se ha popularizado en el campo de la medicina, desafortunadamente en el país el número de estos sistemas es limitado y los existentes no se enfocan en el tratamiento de afecciones de la articulación de la muñeca. Es así como en este trabajo de titulación se implementó un sistema de rehabilitación activa de muñeca enfocado a tratar lesiones de muñeca como: fracturas de huesos, tendinitis de Quervain, neuralgia del nervio mediano, cubital o radial y problemas del túnel carpiano.

El sistema consta de un dispositivo háptico, un ordenador y una interfaz de usuario desarrollada en software Unity 3D. A través del movimiento del dispositivo háptico, el paciente tendrá una realimentación visual por pantalla, una realimentación acústica y una percepción háptica (realimentación de fuerza) debido a los actuadores del dispositivo.

Los ejercicios para trabajar la zona afectada han sido desarrollados bajo los principios clínicos de fisioterapeutas y de sistemas comerciales ya existentes. Estos ejercicios están conformados por trayectorias simples mediante objetos virtuales 3D, detección de colisiones y emulación de fuerzas y texturas.

La validación del sistema se realizó en el consultorio "Huellas Fisioterapia" en un grupo de pacientes con las afecciones antes mencionadas bajo los criterios, supervisión y aprobación de los fisioterapeutas calificados del consultorio.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación de muñeca, realimentación de fuerza, dispositivo háptico, sistema háptico, interfaz gráfica

ABSTRACT

In the last years, using robotics rehabilitation systems has become very popular in the medicine field, unfortunately in our country the number of these systems are limited and few of them focus on wrist injuries. In this work, an active rehabilitation wrist system was implemented for treat injuries as: bones fracture, De Quervain's tenosynovitis, medial, ulnar or radial nerve neuralgia and carpal tunnel problems.

This system has a haptic device, a computer and a graphics user interface (GUI) developed in Unity 3D. The patient will have a visual feedback on a screen, acoustic feedback and a haptic perception through the actuators from haptic device.

Exercises for working the affected zone have been developed under clinical principles of physiotherapists and existing commercial systems. These exercises contain simple trajectories, virtual objects 3D, collision detection, force and shape emulation.

Validation of the system was done in "Huellas Fisioterapia" consulting room with a group of patients whom were affected with the aforementioned injuries. The rehabilitation sessions were realized under the criteria, supervision and approval by qualified physiotherapists.

KEYWORDS: Wrist rehabilitation, force feedback, haptic device, haptic system, graphic user interface

1. INTRODUCCIÓN

La muñeca es la articulación más compleja que existe en nuestro cuerpo y está dentro de las partes más susceptibles a padecer algún desorden músculo-esquelético. Estos desordenes son más frecuentes a causa del uso excesivo de mouse de computadoras, celulares y consolas de video, ya que el usuario realiza movimientos repetitivos de los dedos pulgares en una sola actividad, lo que causa daños en tendones y nervios. En consecuencia, la persona siente dolor al mover la muñeca impidiendo que realice cualquier tipo de actividad.

El diseño de sistemas robóticos de ayuda en la rehabilitación de una persona con afecciones en sus extremidades se encuentra ya disponible en el ámbito comercial de muchos países, sin embargo, en el Ecuador no se cuenta con este tipo de sistemas para la rehabilitación de muñeca, solo se dispone del robot LokoMat en el Hospital Carlos Andrade Marín, que cumple con la función de ayudar a la recuperación de pacientes con un déficit a nivel de los miembros inferiores.

Actualmente, la implementación de sistemas robóticos orientados a mejorar el tratamiento de pacientes con alguna afección en las extremidades es más común, ya que ofrecen gran efectividad en las terapias como muestran estudios realizados [1], además, los sistemas robóticos no experimentan fatiga, por lo que, pueden trabajar continuamente durante largos periodos de tiempo. Este tipo de sistemas cuentan con retroalimentación que proporciona información del ejercicio tanto para el paciente como para el fisioterapeuta.

El sistema a implementar brinda un método interactivo con el paciente, basado en sistemas hápticos e interfaces de usuario. Esta nueva experiencia en la terapia tratará de generar menor rechazo al proceso de rehabilitación debido a que ameniza la duración de la sesión y los movimientos repetitivos mediante juegos (o un sinónimo de distracción); además, buscará aumentar la independencia de los pacientes, ya que el uso del sistema propuesto no requiere una constante intervención del fisioterapeuta, pero es indispensable su supervisión. La interfaz de usuario del sistema contendrá cuatro ejercicios motrices que trabajarán: (1) la activación muscular (de muñeca), (2) el rango de movilidad, (3) reeducación de la prensión y (4) la motricidad fina. Además, se proporcionará al fisioterapeuta datos del ejercicio realizado por el paciente, con lo cual, el especialista podrá tener un mejor seguimiento del proceso de recuperación.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Implementar un sistema háptico para rehabilitación activa de muñeca en el Consultorio Huellas Fisioterapia.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Estudiar la anatomía de la muñeca; las patologías comunes que afectan a esta articulación junto con los ejercicios motrices para su rehabilitación activa; características y restricciones del dispositivo háptico Novint Falcon para el caso de estudio.
- Diseñar la interfaz de usuario en el software Unity 3D que contenga las distintas sub pantallas de los ejercicios motrices con sus distintos niveles de dificultad en base a objetos virtuales, para que se enlace con el dispositivo háptico y exporte a una base de datos las fichas médicas de cada sesión.
- Implementar el sistema de rehabilitación conformado por: el dispositivo Novint Falcon, la interfaz de usuario, un soporte para bloqueo del antebrazo y un eje de presión fina para el dispositivo háptico.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema para que el fisioterapeuta evalúe su desempeño y poder realizar correcciones o calibraciones.
- Validar el sistema desarrollado mediante los resultados de las pruebas realizadas por los fisioterapeutas en los pacientes del Consultorio de Rehabilitación Física “Huellas”.

1.2 ALCANCE

Se investigará sobre el conjunto músculo-articular de la muñeca que se ve afectado en personas con patologías como: fracturas de huesos; tendinitis de Quervain; neuralgia del nervio mediano, cubital o radial y problemas del túnel carpiano.

Se estudiará los ejercicios motrices utilizados en sistemas robóticos de rehabilitación activa comerciales, en donde los movimientos son realizados por el paciente; además, se analizarán las características del dispositivo Novint Falcon con el fin de seleccionar los ejercicios que sean implementables.

La interfaz de usuario será diseñada en el software Unity 3D, será programada en el lenguaje C#, y contendrá la sub pantalla de ingreso de datos del paciente, las diferentes

sub pantallas con los ejercicios motrices y sus diferentes niveles de dificultad. Dentro de esta interfaz se desarrollarán los algoritmos de: comunicación con el dispositivo háptico, interacción entre las sub pantallas, tratamiento de datos de entrada del dispositivo háptico para asociarlo a un objeto virtual, interacción entre los objetos virtuales 3D que serán creados en un software de modelamiento 3D como Blender o Solidworks y los algoritmos de realimentación de fuerza y creación de históricos.

Se desarrollarán cuatro ejercicios motrices con tres niveles de complejidad (doce sub pantallas) dentro de la interfaz de usuario, en cada sub pantalla se desarrollarán algoritmos para la detección de colisiones e interacción entre el objeto virtual (asociado al dispositivo háptico) y los otros objetos con el fin de generar realimentación de fuerza.

En cada nivel se contará con diferentes modelos 3D que serán dotados de características como textura y recubrimiento de mallas mediante programación con el fin de crear modelos 3D compatibles a los algoritmos de detección de colisiones y realimentación de fuerza.

Se desarrollarán diversos algoritmos de realimentación de fuerza en base a los requerimientos del ejercicio motriz mediante la variación de: peso y forma del objeto virtual (asociado al dispositivo háptico), fricción en colisiones y reducción o aumento del espacio de movilidad permitido.

En Unity 3D se implementará una sub pantalla para el ingreso de datos del paciente y se desarrollará una ficha médica que será exportada a una base de datos como SQLite y contendrá los registros históricos de: índice de error, tiempo de ejecución en cada ejercicio y tiempo de duración de la terapia. Para la base de datos se desarrollarán los algoritmos de comunicación con la interfaz de usuario, se establecerá la estructura para almacenamiento y acceso de datos.

Se diseñará y construirá un hardware de soporte para bloqueo del antebrazo, que se utilizará en las primeras sesiones de los ejercicios de rehabilitación y un eje para presión fina a ser empleado en el dispositivo háptico, que permita al paciente realizar movimientos de rotación para trabajar todos los movimientos de la muñeca.

Se realizará pruebas del sistema desarrollado en al menos tres personas con la supervisión de fisioterapeutas del Consultorio Huellas Fisioterapia con la finalidad de verificar su correcto funcionamiento y realizar la calibración adecuada.

Se realizará la validación y aprobación del sistema dentro del Consultorio "Huellas Fisioterapia" por dos fisioterapeutas después que realicen pruebas con sus pacientes.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 FISIOLÓGÍA MUSCULAR

La muñeca es el conjunto articular encargado de establecer una unión entre la mano y el antebrazo. Es el área más compleja que existe en el cuerpo humano por lo tanto existe un gran interés en estudios que permitan entender de mejor manera el funcionamiento de su compleja fisiología y el desarrollo de dispositivos de rehabilitación robótica [2][3].

Para describir la anatomía de la muñeca esta se divide en el sistema óseo, las articulaciones y los ligamentos.

1.3.1.1 Sistema Óseo

El carpo está conformado por ocho huesos carpianos organizados en dos hileras de cuatro cada una, una proximal y una distal. El radio y el cúbito interactúan con estos 8 pequeños huesos proporcionando flexibilidad al carpo, gracias a esta interacción se pueden realizar varios movimientos como la flexión – extensión, aducción – abducción, y circunducción.

La hilera proximal es la más cercana al antebrazo y está conformada por el escafoide, semilunar, piramidal y pisiforme. La hilera distal es la más cercana a la mano, aporta estabilidad al complejo articular y está conformada por el trapecio, trapecoide, hueso grande y hueso ganchoso [4]. La distribución de estos huesos puede observarse en la Figura 1.1.

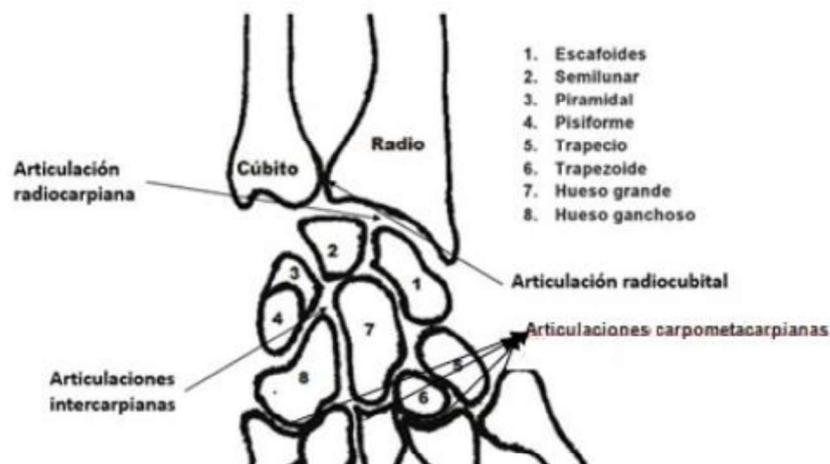


Figura 1.1 Huesos y articulaciones de la muñeca [3]

1.3.1.2 Articulación Radiocarpiana y Mediocarpiana

La articulación radiocarpiana, se ubica entre la parte inferior del radio y los huesos de la hilera proximal del carpo [5], es una articulación sinovial de tipo elipsoidea y su principal función es permitir la articulación entre el carpo y el antebrazo [6]. La articulación radiocarpiana se encuentra en la Figura 1.3.

Esta articulación posee resistentes ligamentos dorsales y palmares.

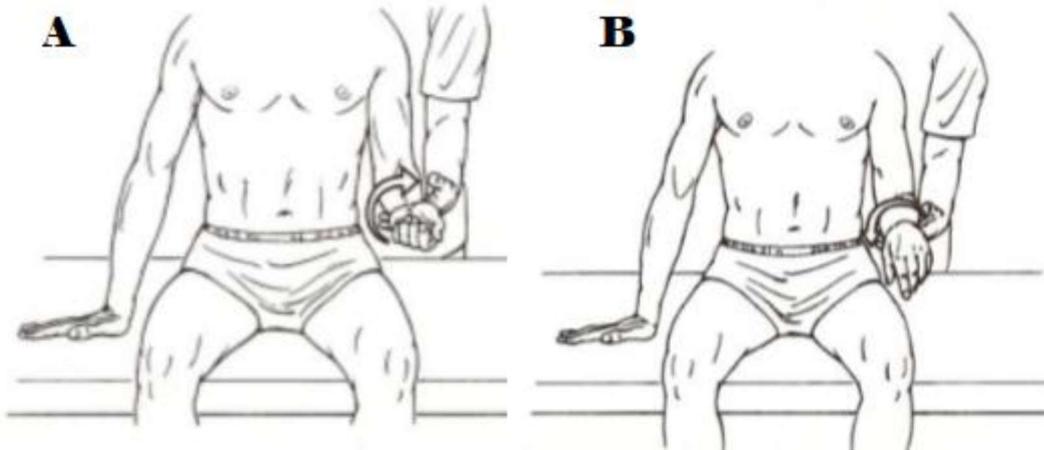


Figura 1.2 (A) Supinación del antebrazo (B) Pronación del antebrazo [7].

Esta articulación aumenta la amplitud de los movimientos de la muñeca mediante pequeños desplazamientos en la articulación mediocarpiana e intercarpiana, los posibles movimientos de la muñeca son flexión – extensión, abducción – aducción y circunducción.

La articulación mediocarpiana, Figura 1.3, se ubica entre las dos hileras de los huesos carpianos. Esta articulación también posee ligamentos palmares y dorsales, cuya función en ambas articulaciones es la de brindar una mayor estabilización a la muñeca.

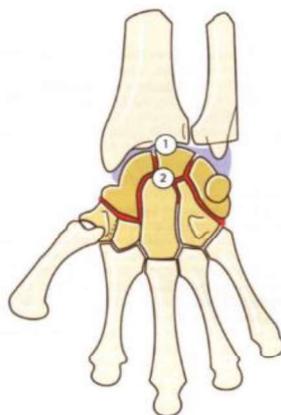


Figura 1.3 (1) Articulación Radiocarpiana (2) Articulación Mediocarpiana [5]

1.3.1.3 Movimientos de la muñeca y sus rangos.

Dado que el carpo solo posee dos grados de libertad los movimientos elementales que puede efectuar se realizan sobre dos ejes vistos con la mano en la posición de máxima supinación, en el eje transversal los movimientos de flexo-extensión y en el eje anteroposterior los movimientos de aducción-abducción. Los rangos de estos movimientos varían según la persona, el tipo de movimiento: activo o pasivo, y la flexión de los dedos [4]. Aunque la muñeca no realice los movimientos de pronación y supinación, Figura 1.2 (movimientos efectuados por el antebrazo), estos ayudan a toda la mano a rotar y ubicarse en distintas posiciones con un rango de movilidad activa de entre 85 a 90 grados [4].

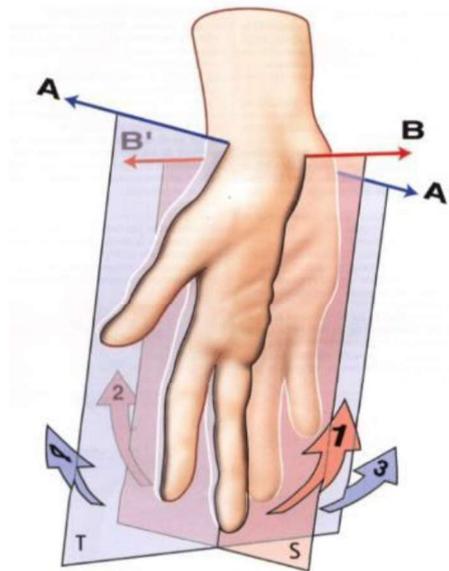


Figura 1.4 Eje transversal (AA') y Eje anteroposterior (BB') [5]

Un movimiento activo es aquel que el paciente realiza con su propia fuerza y voluntad mientras que un movimiento pasivo es aquel en el que por diferentes técnicas se mueve la mano del paciente sin que este realice movimientos voluntarios, es decir no presenta resistencia ni interviene durante el movimiento.

Flexión: movimiento en el que la palma de la mano se inclina hacia la cara anterior del antebrazo, es limitado y depende de varios músculos y del grado de distensión de los ligamentos antagonistas. En pacientes sanos con los dedos extendidos la flexión activa puede variar entre los 70 a 90 grados y en la flexión pasiva se superan los 90 grados [3]. Este movimiento se encuentra ilustrado en la Figura 1.5 y siguiendo la dirección del número 1 en la Figura 1.4.

Extensión: movimiento en el que la cara posterior de la mano se inclina hacia la cara posterior del antebrazo, este movimiento, al igual que el de flexión, se encuentra limitado por el grado de distensión de los ligamentos antagonistas [3] [5]. Existen varios rangos de movilidad para este movimiento pero en general en pacientes sanos la extensión activa puede variar entre los 80 a 90 grados y en la extensión pasiva se pueden superar los 90 grados [5]. Este movimiento se encuentra ilustrado en la Figura 1.5 y siguiendo la dirección del número 2 en la Figura 1.4.

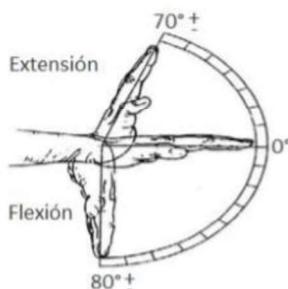


Figura 1.5 Movimientos de extensión y flexión activa de muñeca [4].

Aducción: también llamada inclinación cubital es el movimiento en el que la mano en posición anatómica se inclina acercándose al eje del cuerpo[3]. En pacientes sanos la aducción puede variar entre los 30 a 45 grados [4]. Este movimiento se encuentra ilustrado en la Figura 1.6 y siguiendo la dirección del número 3 en la Figura 1.4.

Abducción: también llamada inclinación radial es el movimiento en el que la mano en posición anatómica se inclina alejándose del eje del cuerpo [3]. Este movimiento tiene un menor rango de movilidad que la aducción, este se ve reducido si la mano no se encuentra en su posición anatómica, en pacientes sanos la abducción suele ser de 15 grados [5]. Este movimiento se encuentra ilustrado en la Figura 1.6 y siguiendo la dirección del número 4 en la Figura 1.4.

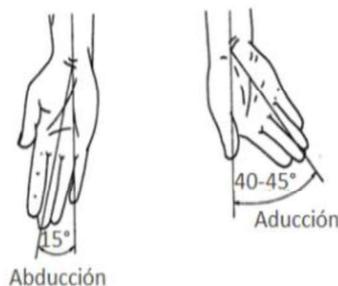


Figura 1.6 Movimientos de abducción y aducción de la muñeca [4].

Tabla 1.1 Límites de movilidad de la muñeca.

Movimiento	Límite de movilidad
Pronación	85 a 90°
Supinación	85 a 90°
Extensión	80 a 90°
Flexión	70 a 90°
Aducción	30 a 45°
Abducción	15°

Circunducción: este movimiento está conformado por la combinación de los movimientos de flexión, extensión, aducción y abducción. El cono de circunducción no describe una superficie circular debido a que su base no es regular, esta base se encuentra determinada por los límites de movilidad de la muñeca Tabla 1.1 y su amplitud máxima se encuentra en el eje transversal ya que los límites de movilidad de flexión-extensión son mayores que los límites de movilidad de abducción-aducción [5]. Este movimiento se encuentra ilustrado en la Figura 1.7.

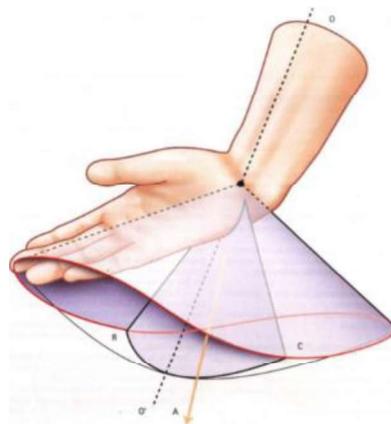


Figura 1.7 Movimiento de circunducción de la muñeca [5]

1.3.2 PATOLOGÍAS

Las patologías de mano y muñeca son de las más comunes en el ámbito laboral, llegando a suponer hasta un tercio de las lesiones totales registradas, sus causas pueden ser múltiples y van desde un mal movimiento del cuerpo, hasta el desgaste del carpo por movimientos repetitivos, etc [8].

Este tipo de lesiones se presentan con mayor frecuencia en personas adultas que realizan deportes en los que exista contacto directo o en los que requieran que el deportista cargue

su propio peso, además en personas que realicen movimientos repetitivos que fuercen al conjunto articular por estar en una posición no favorable para la anatomía humana. Por su parte, el mayor número de lesiones en niños y adultos mayores se da por caídas accidentales [9]. A continuación, presentamos las patologías más comunes que se presentan en mano y muñeca.

1.3.2.1 Tenosinovitis de De Quervain

Este es un tipo de lesión muy frecuente causada por la realización de movimientos repetitivos, afecta principalmente a personas que efectúan agarres bruscos mientras la muñeca se encuentra en posición de desvió cubital [10]. Esta patología provoca inflamación que junto a la desorganización colágena y el depósito mucoide en los tendones produce dolor al hacer movimientos con el pulgar sobre todo en la extensión y abducción [10].

Esta patología afecta mucho más a mujeres que a hombres de mediana edad y se presenta generalmente en la mano dominante de paciente [8]. En la fase inicial las personas presentan dolor a la palpación del lado radial de la muñeca, además de presentar molestias previas al realizar movimientos de rotación que requieran aplicar presión, como destapar envases o utilizar destornilladores [10].

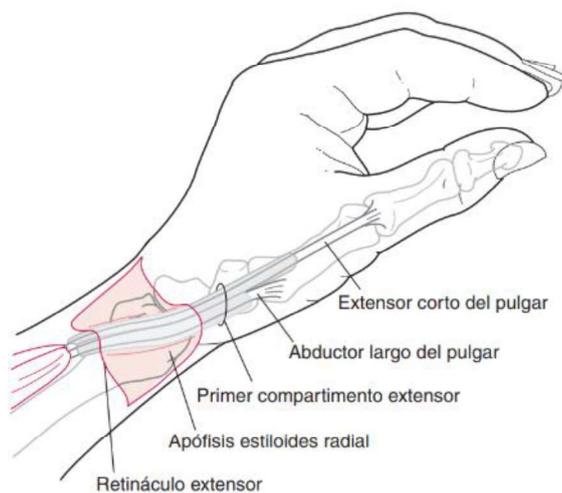


Figura 1.8 Tendones abductor largo y extensor corto [10].

Las modalidades de fisioterapia para esta patología consisten en escoger los ejercicios según la intensidad y tolerancia al dolor, al comenzar se aplica movimientos pasivos sobre el paciente y una vez que la intensidad del dolor disminuya el paciente realiza movimientos activos que le permitan recuperar la movilidad y musculatura [10].

1.3.2.2 Síndrome de túnel carpiano

Esta es una de las neuropatías compresivas más comunes en el ámbito laboral causada principalmente por efectuar repetidamente movimientos tensionantes, o por mantener la mano en una posición forzada por largos periodos de tiempo [11]. En esta patología, el nervio mediano tiende a comprimirse debido a la inflamación que se produce y así surge el síndrome de túnel carpiano [12]. Esta compresión provoca principalmente dolor, sensibilidad al movimiento y disminución de la fuerza muscular [11].

Esta patología está presente con mayor frecuencia en personas de entre 40 a 60 años principalmente en mujeres y ha sido vinculada a factores tanto genéticos como médicos o sociales, sin embargo, la causa más frecuente es el estrés repetitivo sobre el canal del carpo generalmente relacionado con las actividades laborales especializadas en las que solo se requiere utilizar un pequeño grupo de músculos reiteradamente [13]. Entre los síntomas de esta condición están el dolor, debilidad y entumecimiento de la muñeca y mano, esto provoca que se tenga dificultad para sostener objetos relativamente livianos o haciendo que estos caigan [13].

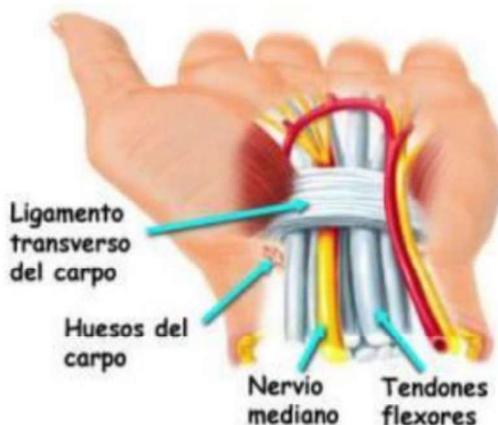


Figura 1.9 Túnel carpiano [11].

Inicialmente las sesiones de fisioterapia ayudan al fortalecimiento del conjunto articular y consisten en realizar estiramientos en los músculos de la extremidad superior cada 30 minutos [13].

1.3.2.3 Fracturas

Las fracturas y luxaciones en la muñeca son lesiones habituales causadas generalmente por golpes bruscos sobre el carpo. La intensidad del golpe y la posición de la muñeca en el instante del traumatismo, en ocasiones, pueden extender la fractura a zonas como el

radio, hombro, etc [14]. Las fracturas en la muñeca pueden ser estables e inestables, las estables son aquellas en que no se produce un desplazamiento de los huesos afectados si el paciente tiene movilidad y las inestables son aquellas en las que los huesos afectados pueden desplazarse si el paciente realiza movimientos cotidianos [10].

Las fracturas en la muñeca al tener tantas partes susceptibles son muy comunes y en su mayoría se presentan en hombres de mediana edad entre 20 a 30 años por caídas accidentales [14]. En los tratamientos conservadores se diagnostica primeramente la zona de lesión ya que esta define el tipo de inmovilización necesaria.

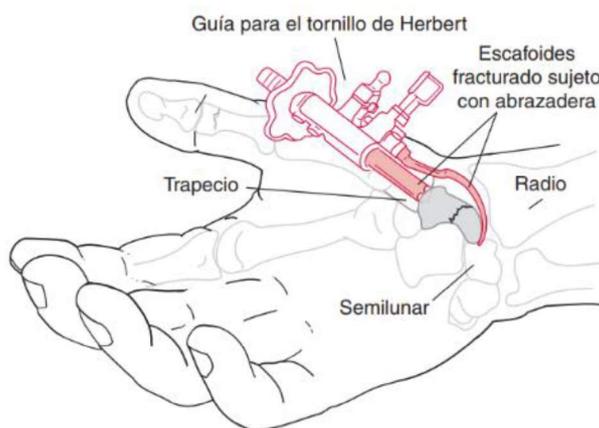


Figura 1.10 Posición del tornillo de Herbert para fractura en escafoides [10].

Una vez retirada la inmovilización necesaria, en esta patología, el carpo ha perdido tanto masa muscular como precisión, por lo que una vez que el dolor a la palpación haya desaparecido se debe realizar terapias de reeducación muscular que permitan a la muñeca afinar su movimiento y fortalecer su musculatura.

1.3.2.4 Neuralgias

Las neuralgias de muñeca son patologías muy frecuentes que afectan a los nervios, encargados de enviar los estímulos de sensibilidad, que atraviesan el carpo. Estas afecciones se producen más en mujeres que en hombres y, principalmente, se presentan entre los 50 a 70 años de edad. Cuando se tiene una neuralgia, la principal prioridad es determinar la zona exacta del dolor para poder localizar el o los nervios afectados [15].

Entre las causas más comunes de las neuralgias sobre el nervio cubital esta la presión sobre el codo o la mano, de manera constante, y las fracturas o dislocaciones del codo. Además, las neuralgias en el nervio radial se producen habitualmente por fracturas del húmero y por presión constante al colgar los brazos [16].



Figura 1.11 Trayectoria del Nervio Cubital y zona de sensibilidad del nervio cubital [17]

Las terapias implementadas consisten en realizar ejercicios repetitivos neuro dinámicos que estimulen, tanto la movilidad como la parte cognitiva del cerebro. Con esto se logra disminuir el dolor en toda la extremidad superior y se va aumentando paulatinamente la movilidad del nervio afectado [17].

1.3.3 EJERCICIOS MOTRICES

La fisioterapia también llamada cinesiterapia o terapia física, tiene como objetivo mantener o mejorar las capacidades funcionales de una persona en su vida cotidiana. Durante la terapia se busca que el paciente desarrolle fuerza, flexibilidad y resistencia. Para la rehabilitación de un paciente hay métodos que incluyen tratamientos activos, pasivos [18].

Los tratamientos pasivos no requieren que el paciente realice movimientos al contrario estos ejercicios incluyen manipulación ortopédica, estimulación eléctrica, ultrasonido entre otros. La cinesiterapia pasiva se clasifica en [19]:

- La cinesiterapia pasiva relajada
- La cinesiterapia pasiva forzada

Los tratamientos activos son aquellos como su nombre lo indica el paciente participa activamente en la ejecución de los ejercicios ya sea con equipos especiales o con ejercicios terapéuticos. Por lo tanto, es necesario que el paciente sea capaz de realizar movimientos

simples con la parte afectada hasta con cierto grado de dolor. La cinesiterapia activa puede clasificarse en:

Por la ayuda proporcionada

- Cinesiterapia activa auto asistida, la ayuda proviene del mismo paciente
- Cinesiterapia activa asistida manual, la ayuda proviene del fisioterapeuta.
- Aparatos u otros medios mecánicos.

Se considera que la terapia asistida por un fisioterapeuta es más eficiente, debido a que el paciente recibe una valoración en el inicio de su tratamiento que determina el programa de ejercicios que mejor se adecuen a sus necesidades, además que el fisioterapeuta es capaz de modificar el tratamiento en base a la mejoría que demuestre el paciente durante las sesiones de terapias.

El uso de dispositivos o equipos que engloben algunas técnicas de tratamiento se conocen como mecanoterapia. Este tipo de equipo puede ayudar al fisioterapeuta durante las sesiones de terapia debido a que pueden ejecutar los mismos ejercicios mediante dispositivos hápticos, sensores y entornos virtuales haciendo más agradable la experiencia del paciente[19].

1.3.3.1 Ejercicios de muñeca

Los ejercicios mostrados a continuación han sido diseñados para recuperar y mejorar la movilidad de la muñeca. Pueden ser aplicados en las patologías descritas anteriormente en la sección 1.3.2 y son compatibles con los movimientos permitidos por el dispositivo háptico. Por este motivo estos son la base del diseño de los ejercicios motrices realizados en la interfaz de usuario del sistema de rehabilitación.

1. Flexo extensión de la muñeca

Para este ejercicio el paciente permanecerá sentado con el antebrazo apoyado sobre una superficie fija, permitiendo que la muñeca sea capaz de moverse libremente. De la posición inicial lleva la mano lentamente hacia arriba y mantiene de 5-10 segundos, como se observa en la Figura 1.12 (A), luego se debe regresar a la posición inicial. Posteriormente, se lleva la mano lentamente hacia abajo e igualmente mantener de 5-10 segundos la posición. De igual forma, se regresa a la posición inicial como se observa en la Figura 1.12(B) [20].

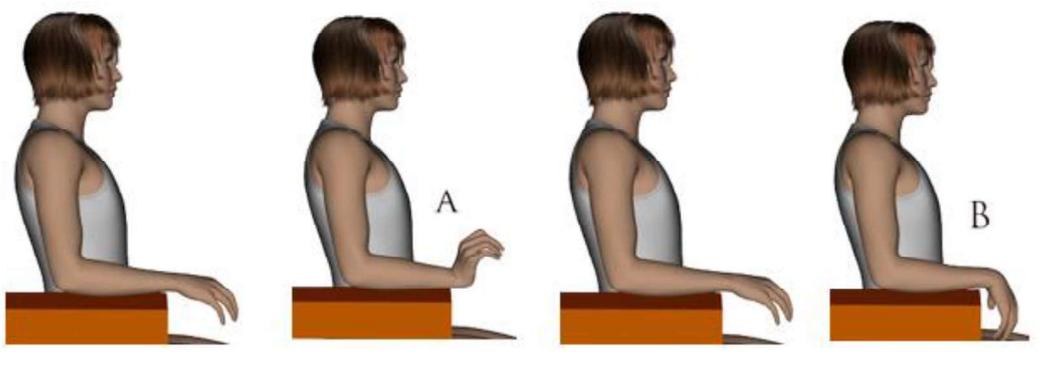


Figura 1.12 Ejercicio de flexoextensión de la muñeca

2. Extensión de muñeca

Para este ejercicio el paciente permanecerá sentado con el antebrazo apoyado sobre una superficie fija. Coloca la mano con la palma hacia arriba, se puede ayudar con la otra mano para realizar la máxima extensión, mantiene la posición de 5-10 segundos y vuelve a la posición inicial, como se observa en la Figura 1.13 [20].

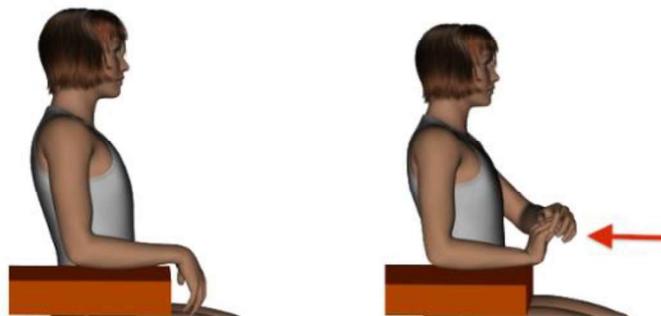


Figura 1.13 Extensión de muñeca

3. Extensión máxima de muñeca

En este ejercicio se requiere que el paciente apoye la mano con la palma abierta en una superficie fija e incline el cuerpo hacia adelante, se debe mantener la posición de 5 a 10 segundos y volver a la posición inicial como se observa en la Figura 1.14 [20].



Figura 1.14 Ejercicios de extensión máxima de muñeca

4. Giro de muñeca

En este ejercicio se apoya el antebrazo en una superficie fija, con la mano extendida debe girar en dirección del pulgar hasta que se sienta tensión en la muñeca, se mantiene la posición durante 10 segundos y luego se vuelve a la posición inicial, como se observa en la Figura 1.15(a). Luego, se gira la mano extendida en la dirección del meñique hasta sentir una tensión, se mantiene la posición durante 10 segundos y se vuelve la posición inicial, como se observa en la Figura 1.15(b) [21].

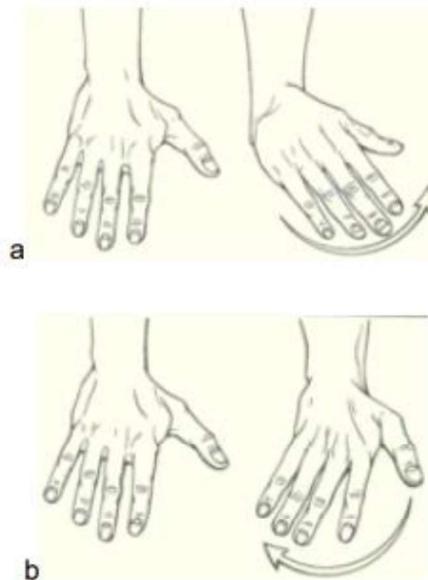


Figura 1.15 Ejercicio de giro de la muñeca

1.3.3.2 Artículos de ejercitación y rehabilitación de muñeca

Dependiendo de la patología las lesiones pueden ser:

- Agudas: Cuando la lesión es causada por una fractura o esguince.

- Progresivas: La lesión es causada por movimientos repetitivos, por ejemplo, la Tendinitis o Neuralgias.

La valoración de un fisioterapeuta es necesaria, ya que algunas de estas lesiones pueden requerir inmovilización, o incluso cirugía. Luego del diagnóstico lo principal es limitar la movilidad de la articulación para evitar el aumento del dolor en la zona[19].

Si la lesión fue catalogada como aguda probablemente habrá inflamación y requerirá un vendaje comprimido o inmovilización de la zona. Para las lesiones progresivas se colocan férulas que limitan el rango de movilidad de la articulación. La siguiente etapa es la movilidad pasiva, aquí el fisioterapeuta realizará movimientos sobre el paciente que ayudarán a estirar la musculatura flexora y extensora de la muñeca. Todo este proceso es considerado como rehabilitación pasiva[22].

Cuando el paciente ha obtenido una mejoría en su movilidad y el dolor haya disminuido, el siguiente paso es aumentar la musculatura perdida por la pérdida de movilidad y reeducar la musculatura para mejorar la motricidad fina afectada. El sistema de rehabilitación a implementar se enfoca en la rehabilitación activa lo cual implica la participación del paciente en el desarrollo de los movimientos y ejercicios, a esta etapa se la conoce como rehabilitación activa.

Durante la inmovilización de la articulación, esta empieza a perder musculatura. Para lograr que el paciente empiece a ganar tono muscular el fisioterapeuta puede trabajar con bandas elásticas, pelotas de distintos pesos, masillas de rehabilitación entre otros. Debido a que en esta etapa el paciente interfiere activamente en la ejecución de los movimientos se tiene artículos como la mesa de manos universal que se observa en la Figura 1.16. Esta mesa ayuda a mejorar el tono muscular e incrementar la potencia y resistencia muscular. Mejorar la coordinación neuromuscular y evitar rigidez en la muñeca [23].



Figura 1.16 Mesa de manos universal

Cuando se habla de motricidad fina se refiere a movimientos coordinados entre la vista y la mano. Durante la rehabilitación se busca mejorar esta deficiencia, a través de ejercicios específicos. Por este motivo, en algunas terapias se utilizan laberintos y pasadores porque, además de ejercitar movimientos de muñeca, permiten desarrollar la coordinación ojo-mano. Como una ventaja adicional, dependiendo de su dificultad, ayudan en la formación de razonamiento lógico. Algunos artículos comerciales pueden observarse en la Figura 1.17.

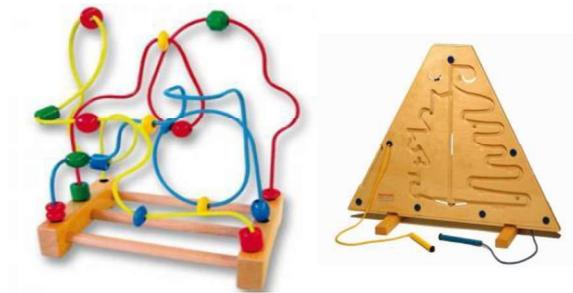


Figura 1.17 Laberinto de Rehabilitación

1.3.4 SISTEMA DE REHABILITACIÓN

Desde sus inicios la robótica ha estimulado la investigación de su aplicación en distintas áreas. La inclusión de la robótica en la medicina ha tenido un lento crecimiento. Actualmente, se aplica en el campo quirúrgico, robótica asistencial, sistemas robóticos de rehabilitación, sistemas de diagnóstico no quirúrgico, por mencionar algunos[24]. Los sistemas robóticos de rehabilitación tienen como objetivo ayudar a personas con afecciones psicológicas, físicas a alcanzar su completo potencial.

1.3.4.1 Sistemas Comerciales de Rehabilitación

La marca InMotion originaria de Estados Unidos se ha especializado en robots de rehabilitación del miembro superior como Inmotion Wrist, Hand y Arm. Inmotion Wrist (Figura 1.18) como su nombre lo indica es un robot de ejercicios para la articulación de la muñeca, posee 3 grados de libertad y permite realizar ejercicios de flexión, extensión, pronación y supinación [25].



Figura 1.18 Inmotion Wrist

La Marca Tyromotion posee algunos sistemas de rehabilitación del miembro superior en su stock, entre los cuales podemos nombrar Amadeo, Diego y Pablo. Diego es un robot orientado en la rehabilitación de hombro, antebrazo y muñeca. Tiene implementado un sistema de compensación de gravedad inteligente lo cual permite realizar rehabilitaciones activas, pasivas o asistidas (Figura 1.19)[26].



Figura 1.19 Sistema de Rehabilitación Diego

Actualmente hay más marcas en el mercado de rehabilitación robótica como Hocoma o Kinetek que buscan brindar una rehabilitación activa, pasiva o asistida. Cada día estas empresas buscan integrar diferentes tecnologías como realimentación de fuerza para compensación de gravedad. Se han mencionado las empresas más conocidas, pero existen varios prototipos en fase de investigación y desarrollo que buscan brindar una mejora en el método de rehabilitación habitual.

1.3.4.2 Desarrollo del sistema de rehabilitación

Para el desarrollo de sistemas es necesario entender su esquema, en la Figura 1.20 se ve la arquitectura de trabajo del sistema. Básicamente se tiene dos partes denominadas la parte humana y la parte del dispositivo [27].

A continuación se describe la parte humana:

- 1) **Dispositivo Háptico:** Se establece un contacto directo entre la muñeca del paciente con el dispositivo háptico.
- 2) **Sensores Biomecánicos:** Las fuerzas aplicadas del dispositivo háptico hacia el ser humano son receptadas a través del sistema nervioso de la zona de contacto. Estas señales nerviosas son enviadas al cerebro. Mediante el sentido de la vista se envía las imágenes de la interfaz visual, también se envía información auditiva que influirán en la toma de decisión.
- 3) **Percepción Humana** (Toma de decisiones): El cerebro percibe las sensaciones del tacto enviadas a través de la realimentación de fuerza y las asocia con la información visual que se muestra en la pantalla de la pc. De tal forma que es capaz de percibir formas, texturas y posiciones de los objetos virtuales y reaccionar a esta información.
- 4) **Músculos** (actuadores): La reacción es realizada a través del sistema motriz, en este caso los músculos. Estos movimientos se realizan sobre el dispositivo háptico realimentando posición hacia la interfaz gráfica.

A continuación se muestra la parte del sistema:

- 5) **Sensores:** En la interfaz el movimiento efectuado por la musculatura se refleja en el objeto virtual asociado al dispositivo háptico. Para obtener el conocimiento de posición el dispositivo cuenta con giroscopios ópticos que permiten determinar la posición actual del efector.
- 1) **Interfaz gráfica:** La información de posición recibida en la interfaz permite actualizar la posición del objeto virtual asociado al dispositivo háptico y su interacción con el mundo virtual. En base a estas interacciones se determinan las acciones de control sobre la realimentación de fuerza que serán enviadas al dispositivo.
- 6) **Actuadores:** Las acciones de control se ejecutan sobre los servomotores del dispositivo háptico que darán la realimentación de fuerza que será percibida por el

usuario a través del tacto. Además se tiene una realimentación visual y gráfica que ayuda al usuario en la toma de decisiones.

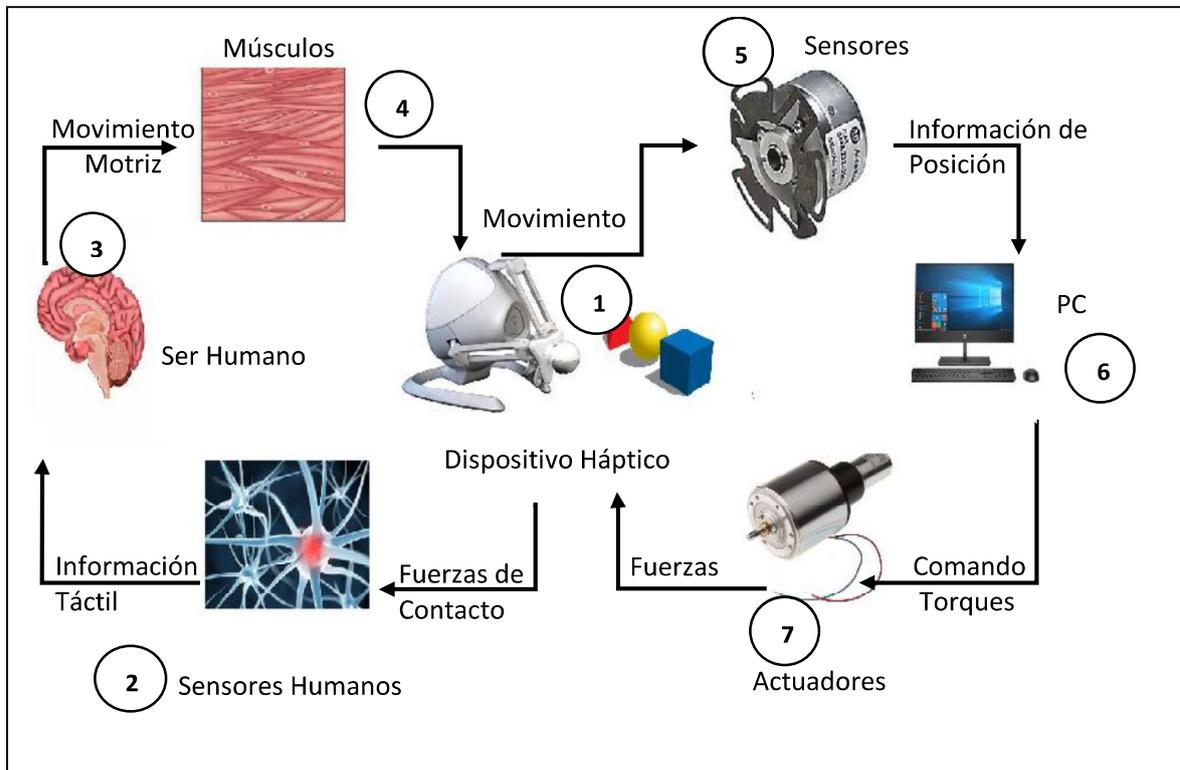


Figura 1.20 Partes de un Sistema Háptico

1.3.4.3 Dispositivos Hápticos

Para el desarrollo de estos sistemas de rehabilitación se hace necesario el uso de dispositivos hápticos. Cuando hablamos de hápticos nos referimos al sentido del tacto, también podemos referirnos a la parte de la ciencia que se dedica a estudiar, desarrollar y emular: texturas, presiones, pesos y vibraciones [28]. Como ejemplo en las consolas de videojuegos se tiene un sistema de vibración.

Se puede definir a un dispositivo háptico como aquel que permite al usuario la manipulación, creación e interacción con objetos virtuales simulados en un ambiente virtual mediante el sentido del tacto.

Al referirnos a dispositivos hápticos implícitamente hablamos de realimentación de fuerza. Esta función permite al usuario tener una comunicación bidireccional con el entorno virtual, ya que no solo recibe la información acerca de los objetos que habitan en él, sino también

puede modificar su posición o forma mediante la interacción con los mismos [29]. A continuación, se describirán los dispositivos hápticos más destacados en el mercado.

- **Geomagic Touch**

La Marca 3D Systems es una empresa líder en servicios de ingeniería y software. Ha desarrollado dispositivos hápticos conocidos como Geomagic Touch (Figura 1.21a) y Geomagic Touch X (Figura 1.21b) [30], los cuales son reconocidos a nivel industrial y frecuentemente usados en aplicaciones médicas, científicas, de tele operación o en modelamiento 3D.

Los dos dispositivos de esta marca se caracterizan por tener 6 grados de libertad y una realimentación de fuerza en los 3 ejes (x,y,z). Esta marca tiene un kit de herramientas que se basa en la API de OpenGL llamado Open-Haptics. Este kit contiene multiples herramientas como HDAPI (Haptic Device API) o HLAPI (Haptic Liary API) las cuales pertenecen a OpenHaptics SDK. Estos componentes permiten que los dispositivos de esta marca sean compatibles con algunos software.

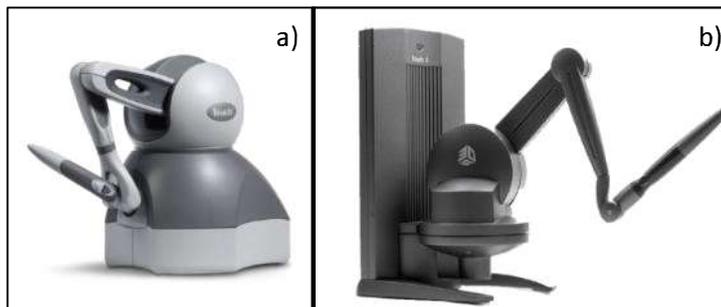


Figura 1.21 a) Geomagic Touch. b) Geomagic Touch X

- **Novint Falcon**

El dispositivo Novint Falcon (Figura 1.22) fue fabricado por la empresa Novint Technologies Inc, ahora es un producto distribuido por Force Dimension. Es un robot paralelo cinemático con realimentación de fuerza. Este equipo tiene HDAL SDK que contiene los drivers y librerías necesarias para el desarrollo de ambiente hápticos [31]. Es considerado un dispositivo háptico de bajo costo con 3 grados de libertad y realimentación de fuerza en los 3 ejes (x, y, z).



Figura 1.22 Dispositivo Háptico Novint Falcon

- **Omega 7**

Omega 7 (Figura 1.23) diseñado por la marca Force Dimension es considerado el dispositivo háptico más avanzado en la industria. Se basa en los modelos anteriores de la misma marca con las ventajas de un agarre activo de mayor precisión, una pinza con realimentación de fuerza que provee capacidades hápticas excepcionales. Tiene un nuevo diseño mecánico desarrollado para ser robusto, tiene 7 grados de libertad y con una alta velocidad de fuerzas de contacto que permite tener una mejor transparencia háptica. Posee un SDK que permite un control avanzado sobre todos los dispositivos Force Dimension, ese SDK ofrece un soporte para un gran número de sistemas operativos tanto en 32 como en 64 bits. Es usado en aplicaciones aeroespaciales, médicas, de seguridad, entre otras.



Figura 1.23 Dispositivo Háptico Omega

Cada uno de los dispositivos ofrece ventajas y desventajas en cuanto a capacidad, velocidad, grados de libertad, comunicación, por mencionar algunas. En la Tabla 1.2 se mostrará una tabla comparativa con las características más importantes de los dispositivos hápticos mencionados anteriormente.

Tabla 1.2 Comparación de dispositivos hápticos

Características	Geomagic Touch	Geomagic Touch X	Novint Falcon	Omega 7
Precio	\$ 3800	\$ 15 600	\$ 500	\$ 20 000 – \$ 50 000
Grados de Libertad	6	6	3	7
Espacio de Trabajo	>160 W x 120 H x 70 D [mm]	>160 W x 120 H x 70 D [mm]	102 W x 102 H x 102 D [mm]	160 W x 110 H x 25 D [mm]
Tamaño	143 W x 184 D [mm]	143 W x 184 D [mm]	223 W x 223 H x 223 D [mm]	300 W x 270 H x 350 D [mm]
SDK	-Open Haptics Toolkit (múltiples API's) -Compatible con multiplex plataformas	-Open Haptics Toolkit (múltiples API's) -Compatible con multiplex plataformas	- Novint HDAL SDK. - Lenguaje de Programación C	- Haptic SDK - Robotic SDK - Microsoft - Linux - Apple
Interfaz	USB 2.0	RJ45 Puerto Ethernet	USB 2.0	USB 2.0 Hasta 4 Khz1
Fuerza máxima	3.3 N	7.9 N	10 N	12.0 N

1.3.4.4 Interfaz gráfica

Una interfaz gráfica permite mostrar al usuario final de forma visual, auditiva, háptica, etc., todo el contenido de una aplicación o plataforma mediante la creación de los objetos virtuales y la programación de la interacción que tendrán entre ellos. Esta interacción se realizará por medio del dispositivo háptico utilizado para manipular los objetos virtuales, a través del sentido de tacto y comandar la realimentación de fuerza.

Es importante que una interfaz gráfica emule la realidad y sea amigable para el usuario, por esto su diseño y programación son elementales. Para su programación, se deben considerar varios factores como: las leyes físicas del escenario; la interacción con el ambiente; pesos, tamaños, formas y estructuras de cada objeto; la visualización del escenario; entre otras.

Además, al realizar una interfaz gráfica que requiere un enlace háptico con el usuario, se deben tomar en cuenta más consideraciones para su correcto funcionamiento como la separación entre lo que es el mundo visual de lo que se define como mundo háptico. Este mundo háptico es el encargado de manejar todas las cualidades de un objeto virtual que

requiere ser emulado por el sistema háptico; es decir, este mundo háptico solo percibe la existencia de aquellos objetos que requieren ser emulados, mientras que el mundo visual percibe todos los objetos que se encuentran en la escena.

Por lo tanto, la programación de este mundo tiene otros factores a considerarse como: la interacción entre objetos virtuales con y sin propiedades hápticas; dureza, movilidad, peso emulado de los objetos; mallas de recubrimiento (forma y tamaño que percibirá el mundo háptico sobre un objeto virtual); limitaciones de movilidad (angulares y traslacionales); definición de trayectorias permitidas; creación y eliminación de las propiedades hápticas de un objeto; entre otras.

La correcta vinculación entre estos dos mundos, por medio de la programación desarrollada, es lo que posibilita tener una interfaz gráfica completa que permite al usuario obtener información visual, auditiva y háptica coordinada.

Para el desarrollo del sistema de rehabilitación se requiere algunos software que nos permiten crear interfaces de usuario amigables, entre ellos se destacan Unity, CHAI 3D, SenseGraphics H3D y para el modelamiento de las figuras 3D software como: Blender o Solidworks. A continuación, se mostrará un resumen de las principales características de los software antes mencionados:

- **Unity**

Unity es un motor orientado al desarrollo de videojuegos en 2D y 3D, cuenta con la ventaja que los juegos desarrollados pueden ser importados a distintas plataformas tanto para dispositivos de escritorio, consolas y dispositivos móviles.

Entre las ventajas podemos destacar:

- Permite agrupar de manera más sencilla las escenas de trabajo mediante un editor intuitivo.
- Debido a que es capaz de ser compatible con distintas plataformas, puede adaptarse a la resolución de videojuegos en pocos pasos.
- Permite importar modelos y animaciones de otros software 3D como: Blender, 3ds, Maya, entre otros.
- Permite la programación de scripts en el lenguaje C#.

Como desventaja podemos mencionar:

- No posee un soporte nativo para todos los dispositivos hápticos, como el dispositivo Novint Falcon.
- El programa usa bastantes recursos de la computadora en el diseño de las escenas, por esto se debe verificar el sistema de ventilación debido a que durante la ejecución el computador tiende a calentarse.

- **Blender**

Blender es un software 3d gratuito que permite realizar objetos y animaciones 3D. Es compatible con una gran variedad de plataformas, una de ellas es Unity 3D. Un modelo de blender importado en Unity puede ser modificado y los cambios se verán reflejados en este software sin necesidad de ser reimportado.

Blender fue utilizado en la creación de modelos 3D, estos modelos pueden ser unidos, modificados, dotados de texturas y mallas.

Entre las ventajas que presenta tenemos:

- No ocupa mucho espacio en el disco duro, considerando que posee un motor de juegos interno no requiere un gran procesador para cosas simples.
- Es fácil de aprender y ofrece a los usuarios mucha información en línea, así como tutoriales.
- Ofrece una gran cantidad de herramientas y opciones de modelado para ser un software gratuito.
- Los modelos en formato blender son compatibles con el software Unity.

- **Solidworks**

Solidworks es un software de diseño CAD en 2D y 3D. Permite realizar el modelamiento, diseño de piezas 3D, ensamblajes, simulaciones. Es compatible con Windows Microsoft. Ofrece grandes herramientas como aplicación de texturas, materiales, sistemas enrutados. Permite la validación de modelos con el fin de asegurar el diseño más óptimo. En este caso tenemos una opción de simulación que nos permite ver el comportamiento de nuestro diseño bajo ciertas condiciones como agua, viento y calor, etc [32].

2. METODOLOGÍA

El sistema propuesto tiene 3 principales componentes: la computadora que contendrá la interfaz de usuario o ambiente virtual, el dispositivo háptico y el paciente que cierra el lazo.

En la Figura 2.1 se observa una representación simplificada del sistema implementado, el cual consta del usuario en este caso paciente, los aditamentos mecánicos para mejorar la ergonomía, el dispositivo háptico y la interfaz de usuario con los diferentes ejercicios motrices.



Figura 2.1 Sistema de Rehabilitación Implementado

2.1 HARDWARE

2.1.1 DISPOSITIVO HÁPTICO

Para el desarrollo del sistema se seleccionó un dispositivo háptico de mínimo 2 grados de libertad para los ejercicios de la muñeca que sea programable con Unity 3d y de un precio asequible para un consultorio de fisioterapia convencional. Por tales razones y en conjunto con la información obtenida en la Tabla 1.2 se escogió el dispositivo Novint Falcon.

Distintas áreas como computación, entrenamiento médico, videojuegos, animación por computadora, diseño de animaciones 3D, rehabilitación médica, tele operación y control de robots utilizan Novint Falcon. La realimentación de fuerza que genera este dispositivo puede ser percibido por el usuario a través de la musculatura y la piel que estén en contacto directo con el dispositivo háptico [33].

Desde que se lanzó al mercado en el 2008 se han publicado numerosos trabajos sobre el uso de este dispositivo en la rehabilitación médica enfocado a rehabilitación de muñeca, miembro superior y en neurorrehabilitación. Debido a su rango de movimiento no se recomienda mucho su uso en la rehabilitación de brazo, ya que no se logra trabajar la musculatura necesaria.

En un estudio realizado sobre el efecto de la fuerza de realimentación de este dispositivo en el miembro superior se demostró que los dispositivos hápticos pueden ser usados para entrenar y rehabilitar los músculos [34]. Esto implica que puede ser utilizado como parte complementaria de la sesión.

Este dispositivo posee las siguientes características:

- Área de trabajo: 10.16 x 10.16 x 10.16 cm.
- Capacidades de fuerza son mayores a 0.90 kg.
- Resolución de posición 400 dpi (puntos por pulgadas)
- Interfaz de comunicación USB 2.0
- Potencia 30 W, Alimentación 110v – 240 v, 50Hz – 60Hz.
- Los motores operan a una frecuencia de 1 kHz.

2.1.2 DISEÑO E IMPRESIÓN DE PIEZAS 3D

Con la finalidad de obtener un mando de control más ergonómico y un apoyo para el antebrazo del paciente se desarrolló en el Software de diseño SolidWorks dos piezas que son acopladas al sistema, la primera pieza se acopla directamente sobre el dispositivo háptico y la segunda se sujeta sobre la mesa donde se ubicará el sistema completo, ambas piezas después de ser diseñadas se imprimirán en formato 3D.

2.1.2.1 Eje de Presión Fina

El dispositivo háptico Novint Falcon posee de fábrica un efector final en forma de esfera Figura 2.2. Esta estructura dificulta el agarre en ciertos tipos de pacientes y, en ciertos casos, produce dolor al tratar de presionar sus botones. Debido a esto, se decidió cambiar el diseño de esta esfera por un eje de presión fina en forma de lápiz. La arquitectura de este eje fue supervisada y aprobada por los fisioterapeutas del Consultorio Huellas Fisioterapia, con el fin de asegurar un buen diseño que cumpla la función establecida.



Figura 2.2. Efector final del dispositivo Novint Falcon [35]

El diseño de esta pieza fue desarrollado en SolidWorks y consta de cuatro partes principales, dos casquetes que forman una semiesfera y un eje de prensión fina alargado dividido en dos mitades. Debido a las protecciones que posee el dispositivo Novint Falcon, no fue posible realizar todo un efector final nuevo para este proyecto; sin embargo, se logró acoplar la pieza diseñada sobre el efector que viene de fábrica con el dispositivo, ya que la placa nativa quedó en el interior del nuevo efector; por lo que fue necesario añadir un botón adicional, ubicado en la parte izquierda del eje de prensión fina. Las partes constitutivas de este aditamento mecánico se encuentran representados en la Figura 2.3. En la Figura 2.4 se ve vistas de las piezas 3D ensambladas y sus diseños se encuentran en el Anexo B.

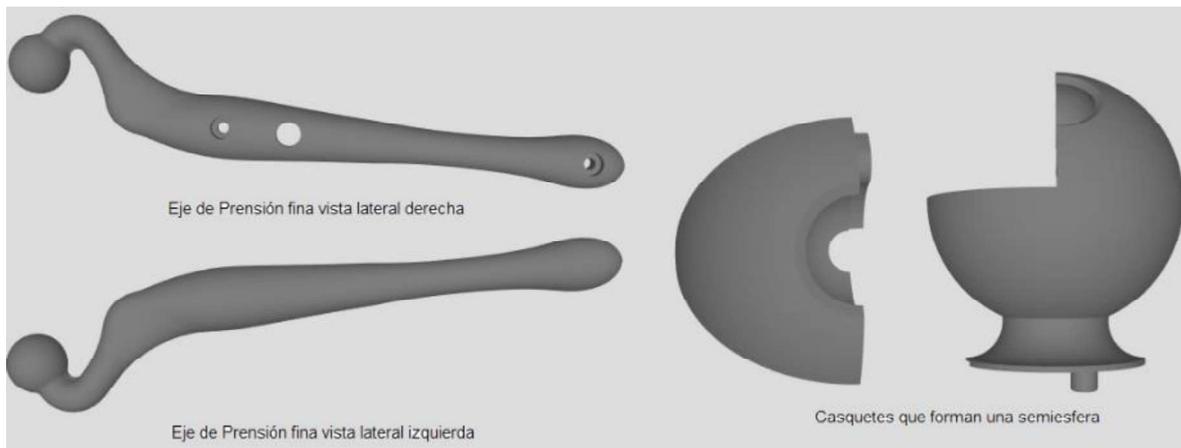


Figura 2.3 Piezas diseñadas en 3D

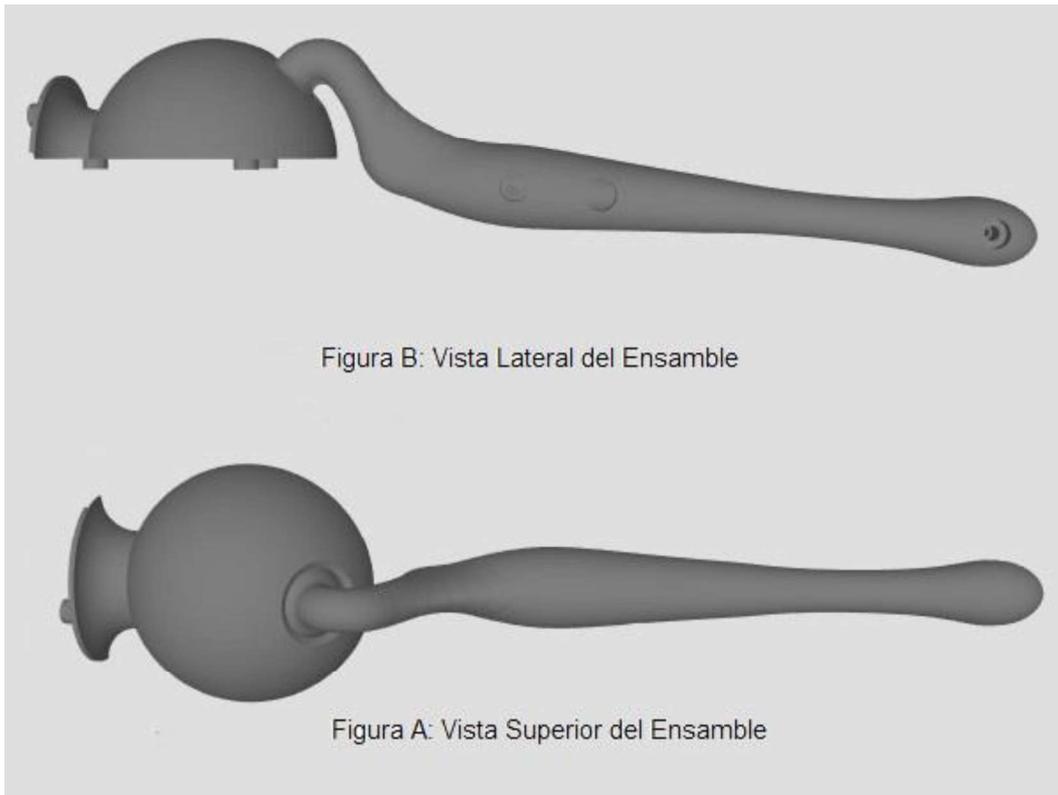


Figura 2.4 Vista de las piezas 3D ensambladas

2.1.2.2 Soporte de Antebrazo

Según la marca del dispositivo háptico y las recomendaciones de los fisioterapeutas se decidió usar un soporte para el antebrazo, con el fin de reducir la fatiga y cansancio del miembro superior del paciente después de una larga sesión, Además, al bloquear parcialmente el movimiento del antebrazo se intensifica el esfuerzo sobre la muñeca. Por todo esto, se diseñó un soporte en forma de U para el antebrazo Figura 2.5. Este soporte tiene un largo de 19 cm y una altura aproximada de 10 cm. Estas medidas fueron un promedio entregado por los fisioterapeutas para tener un buen apoyo. Este dispositivo no se utilizará en todas las sesiones, solo cuando exista la necesidad de usarlo, dependiendo del desempeño del paciente; además, para poder anclarlo a la mesa de trabajo se descargó de Internet un sistema de engranes que cumple la función de pinza.

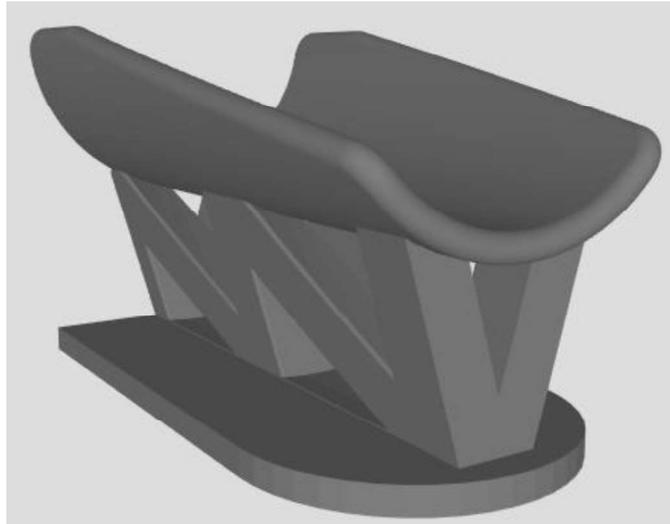
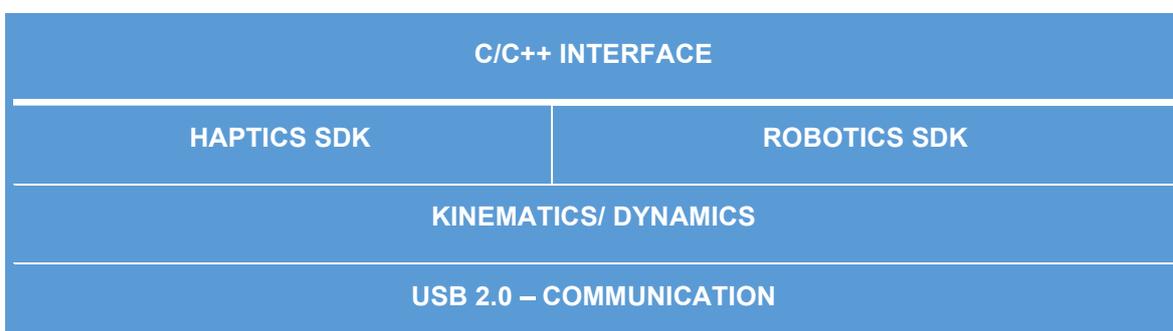


Figura 2.5 Diseño del Soporte del Antebrazo

2.2 COMUNICACIÓN

Los dispositivos de Force Dimension, en este caso Novint Falcon, usan Haptic SDK que permite al usuario controlar el dispositivo de una manera menos compleja. Este SDK posibilita al usuario, mediante la programación en C y C++, aprovechar al máximo las capacidades del dispositivo. Además, es compatible con una gran cantidad de software y paquetes de visualización como: CHAI 3D, SenseGraphics H3D, Reachin API, Haptika, Matlab, Labview, entre otros.

Haptic SDK provee un rango de funciones de bajo nivel que hace posible acceder y controlar cada aspecto del dispositivo háptico. Force Dimension, además, provee el software Robotic SDK que se dirige al desarrollo de aplicaciones robóticas, colaborativas.



La HDAL es la capa de abstracción del dispositivo háptico que tiene un sistema de subcapas que se comunican con la aplicación. En la Figura 2.6 se encuentra el esquema de la estructura de esta capa [27].

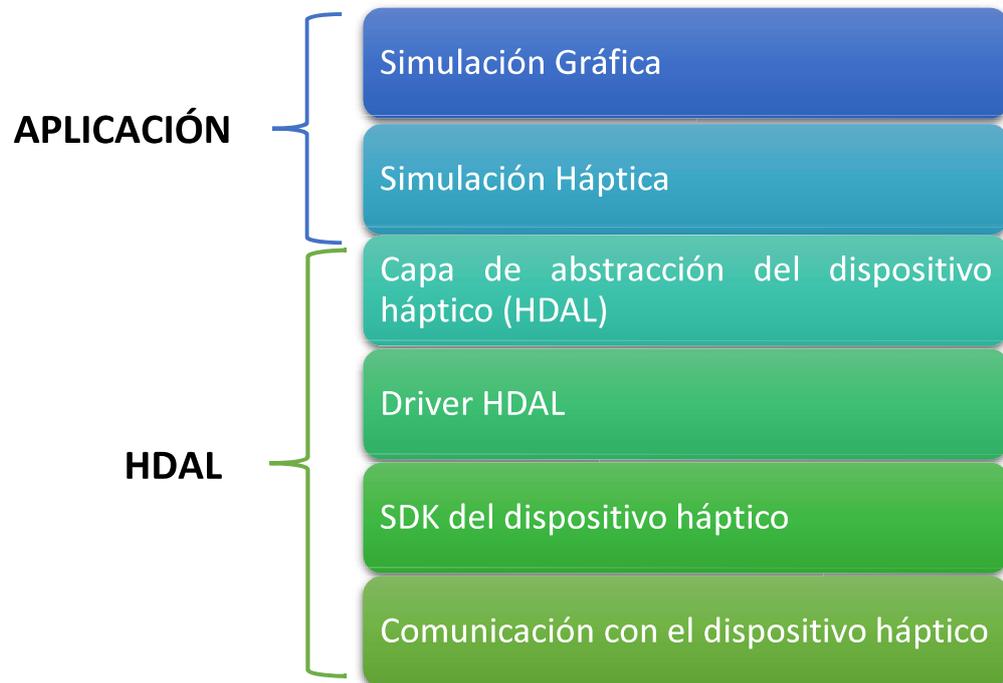


Figura 2.6 Arquitectura de la HDAL del dispositivo Novint Falcon

El dispositivo Novint Falcon no posee un soporte nativo en el software Unity 3D, posee un plugin de paga con funciones limitadas. Para este proyecto se usó como base una librería que se encuentra en la referencia [36]. Con la librería FalconUnity [36] se desarrollaron las funciones que permiten al usuario sentir los objetos virtuales por medio de la realimentación de fuerza y, al mismo tiempo, obtener el valor de posición del efector del dispositivo háptico.

Esta librería se conforma de dos partes principales: una aplicación ejecutable que recibe los paquetes de datos entre la interfaz de usuario y, la segunda, es una librería dinámica que se comunicará con el dispositivo háptico, en la Figura 2.7 se muestra un esquema de comunicación.

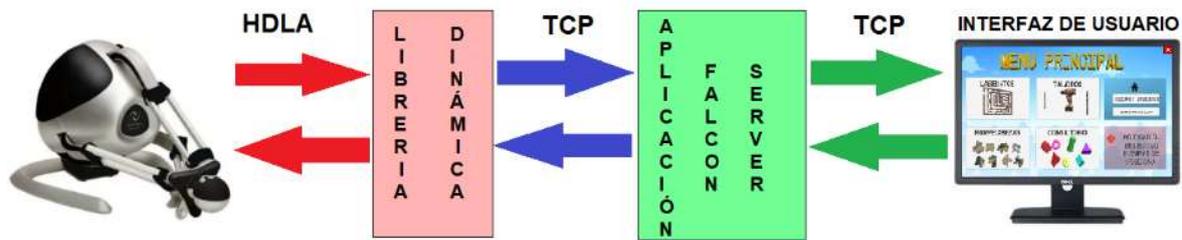


Figura 2.7 Esquema de Comunicación

2.2.1 LIBRERÍA DINÁMICA

La librería dinámica realiza las funciones de comunicación del dispositivo con la aplicación. Se puede modificar sus funciones con base a los requerimientos del programador. A continuación, se menciona las librerías de mayor relevancia:

Bullet: Funciona como un motor de física, permite detectar colisiones, y dinámicas de los objetos.

Boost: Es un conjunto de librerías, para esta aplicación se usa las librerías array, thread y timer. Array permite crear un contenedor de las matrices que puede tener una figura STL. Thread permite el uso de múltiples hilos de ejecución con información compartida en el código C++. Timer es un temporizador, contador de tiempo y toma muestras.

Hdl / Hdlu: Estas librerías tienen funciones específicas para comunicarse con el dispositivo háptico como obtener el valor de posición, estado de los botones y envió de la realimentación de fuerza.

La librería es muy extensa, pero se resumirá su contenido. Al principio se realiza la llamada a todas las librerías necesarias. La clase kinematic motion state se encarga de ajustar el área de trabajo a las mismas dimensiones que se maneja en la interfaz de usuario.

La clase Falcon Interface Class es la clase más utilizada, posee variables públicas y privadas, así como funciones que pueden ser ejecutadas en otras partes del código. Entre las funciones se tiene: detección de colisiones, cálculo de fuerza, obtención de posición, revisión de banderas, lectura del estado de los botones, aplicación de fuerza, escalación de variables.

La clase Damped String no se usa con mucha regularidad, posee características que se aprecian en la clase anterior con la funcionalidad que realiza el cálculo de fuerza en un objeto rotativo.

Las clases contienen variables públicas y funciones que pueden ser accedidas en el resto del código por otras funciones. Para la comunicación con la aplicación Falcon Server se utilizan funciones que usan las librerías y las clases antes mencionadas. Para las funcionalidades como creación de objetos en el mundo háptico, obtención de posición, estado de botones, envío de realimentación de fuerza, interacción de los objetos en el mundo háptico en las colisiones y actualizar los parámetros de los objetos como masa, forma, rotación, posición entre otros

2.2.2 APLICACIÓN FALCON SERVER

Esta aplicación está programada en el lenguaje C++, usa el puerto 8747 que utiliza el protocolo TCP para establecer el envío y recepción de datos entre la Aplicación de Usuario y la librería dinámica. A continuación, se explicará en mayor detalle cómo funciona esta aplicación.

Se inicializa Wincsock que es una librería dinámica de funciones DLL de Windows, contiene soporte para envío y recepción de paquetes de datos por medio de sockets. Luego, se utiliza la función que permite que el cliente encuentre los datos para la creación de un socket para un servidor dado, en este caso, la aplicación. Posteriormente, se crea un socket que funciona mediante un sistema bajo pedido y establece un puente de comunicación entre la interfaz y la aplicación. Con base a esto, en el siguiente paso se configura el modo escucha del socket, se establece que si en un plazo de 10 segundos no hay respuesta por parte del cliente asuma que está desconectado y cierre la comunicación; caso contrario, recibe el paquete de datos proveniente del cliente y procede a actualizar parámetros necesarios en la librería dinámica. Una vez adquiridos los datos el mensaje es recibido desde esta librería para actualizar los parámetros en la interfaz del usuario.

De esta manera, existe un constante intercambio de información. Por ello, esta aplicación debe permanecer abierta durante la ejecución de la interfaz de usuario. Debido a que es una comunicación TCP es muy importante que se hayan enviado los datos en el orden y en el formato que se requiere, cuando se desea añadir parámetros de envío, en la librería dinámica, es necesario que estos también sean considerados en la aplicación, de lo contrario, habrá fallas al momento de analizar el paquete por secciones y no se podrá actualizar la información.

Para la construcción de esta aplicación, es necesario revisar que la librería dinámica esta añadida y que se incluya la ubicación del archivo, sino se generarán errores.

2.2.3 ENLACE A UNITY

En un script de Unity se crea una clase pública que puede ser accedida por otros. Esta clase contiene funciones para abrir la comunicación con la aplicación Falcon Server el número de dispositivos, la función de parar para detener la comunicación y limpiar el mundo háptico que se haya creado en la librería dinámica, en la función desconectar se cierra la comunicación con la aplicación.

La función Actualizar se llama una vez por frame, inicializa y obtiene el paquete de datos. Al inicio se actualizan los parámetros procedentes del paquete hacia los objetos virtuales que se encuentran en la escena. Después, se procede a generar el paquete de datos con la información de la interfaz de usuario.

Ya una vez obtenidos los datos del socket se analizan y se realizan las funciones que se utilizarán en la escena como: posición del TipObject, GodObject y de los objetos virtuales capaces de generar realimentación de fuerza.

Para formar el paquete de datos se envían parámetros dependiendo del objeto virtual. El GodObject y TipObject remite datos de masa, radio y posición. En los objetos virtuales que generar realimentación se envía: la forma del objeto, peso, constante de amortiguamiento, orientación, posición de inicio. Otros parámetros son valores de fuerza para emulación de pesos.

DESARROLLO DE INTERFACES

En el diseño de la interfaz de usuario se utilizaron diversos software para crear un ambiente amigable a la vez que permita la interacción con el dispositivo háptico. El desarrollo de los ejercicios motrices se realizó en Unity con ayuda de la librería dinámica FalconUnity que permite usar la realimentación de fuerza y la lectura de la posición del dispositivo háptico. Para el desarrollo de objetos virtuales 3D se utilizó el software Blender debido a que es compatible con Unity 3D y los modelos 3D diseñados pueden ser dotados de texturas y mallas. Por último, el sistema requería el almacenamiento de datos para la creación de archivos históricos usando SQLite. A continuación, se detallan características relevantes del software Unity en este desarrollo.

La interfaz de usuario está programada en Unity 3D y junto con su motor gráfico se realiza la interacción entre objetos virtuales de manera realística y ofrece funciones como: render para gráficos 3D y 2D, detección de colisiones, iluminación, sonidos, animación, interacciones entre gráficos, textos por mencionar algunos.

Unity 3D utiliza C# que es un lenguaje orientado a objetos a través del editor de texto Visual Studio. La programación se realiza en diferentes subprogramas llamados scripts, los cuales contienen: el movimiento, posición, interacción, características de los Gameobjects (objetos virtuales) [37].

En Unity la programación se realiza bajo conceptos como el de parentesco que consiste en que si debajo de un objeto se agrupan otros estos son considerados “hijos” y el objeto principal “padre”. Es útil cuando se tiene un número grande de objetos y se requiere cambiar sus propiedades al mismo tiempo.

Otra de las funcionalidades de Unity es el uso una o varias cámaras, el uso de fuentes de iluminación y efectos visuales las mismas que son detalladas a continuación:

La cámara es el objeto que define la vista de la escena, puede ser colocada en una posición fija o puede dar seguimiento a un objeto virtual al colocarla como su hijo.

En la iluminación se generan fuentes de luz de diferentes maneras, ya sean puntos de luz, reflectores, luces direccionales y áreas de luz. Dependiendo de las necesidades del usuario, se puede combinar y obtener diferentes resultados en escena. En los efectos visuales se destacan: halos y sistemas de partículas. El primero es un área clara de luz alrededor de un objeto, uno de sus objetivos es simular partículas de polvo bajo una fuente de luz.

El sistema de partículas es usado para simular explosiones, nubes de partículas como polvo, humo, aserrín, entre otros.

En Unity se llama Canvas al modo donde el usuario puede interactuar con el programa mediante: menús, botones, sliders, imágenes, textos, avisos, entre otros. Los elementos colocados en Canvas tienen un orden jerárquico al ser colocados en la escena y su aparición dentro de la misma. Otra ventaja es que el tamaño, escala, posición de la cámara, resolución de la pantalla pueden ser adaptados según las necesidades.

2.2.4 DESARROLLO DE LOS EJERCICIOS MOTRICES

Las interfaces de los ejercicios motrices se realizan en Unity 3D, una vez finalizadas se añadirán las funciones de registro y la interfaz general de usuario, donde los especialistas podrán llevar un control y realizar consultas de cada paciente. Para iniciar con el desarrollo de los ejercicios motrices se realiza una investigación sobre ejercicios utilizados por otros sistemas comerciales para rehabilitación de muñeca junto con el asesoramiento de los fisioterapeutas del Consultorio “Huellas” Fisioterapia. Con esta información, se determina

los movimientos que deben realizar los pacientes y que pueden ser realizados con el uso del dispositivo háptico Novint Falcon.

Una vez analizada esta información, se determina los movimientos principales que sirven para la rehabilitación activa de muñeca y que pueden ser imitados mientras el paciente realiza los ejercicios con el dispositivo háptico. La dinámica de los ejercicios motrices se desarrolla a partir de los movimientos compatibles mostrados en la Figura 2.8. De tal manera que la interacción con los objetos virtuales de cada escena permita al paciente realizar estos movimientos repetidamente durante la sesión.

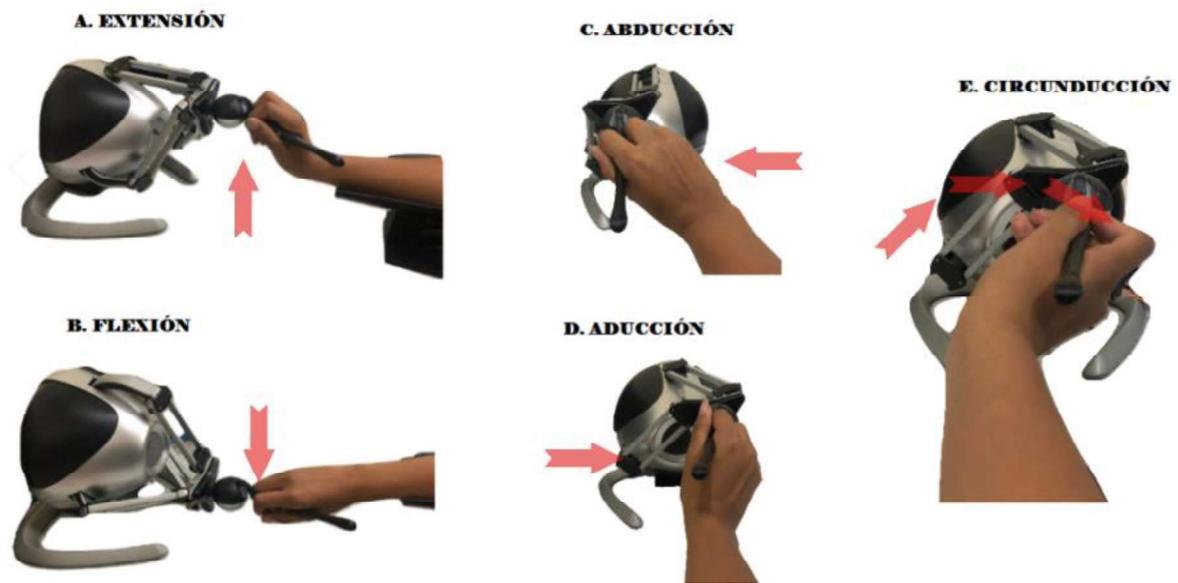


Figura 2.8 Movimientos de muñeca permitidos por el dispositivo Novint Falcon

Las interfaces de cada ejercicio integran partes como: el dispositivo háptico Novint Falcon, los objetos 3D diseñados en el software Blender, los scripts creados en Visual Studio y la interfaz mostrada en Unity 3D. Cada uno de estos ejercicios emulan situaciones reales y se basan en ejercicios utilizados por sistemas de rehabilitación comerciales.

Para el desarrollo de las interfaces se tomó en cuenta varios conceptos y herramientas que se utilizarán en la mayoría de escenas que manejan el dispositivo háptico.

Realimentación de fuerza

En este proyecto se manejan diferentes objetos virtuales, pero no todos poseen la característica de generar una realimentación de fuerza cuando hay un choque sobre las mismas. En la librería dinámica 2.2.1 se realizan el cálculo de la fuerza, para ello se obtiene matrices de datos con los triángulos y vértices de los objetos virtuales que serán percibidos

por el usuario. Con estas matrices y junto la librería boost array se generan las figuras dentro de la librería y mediante la librería bullet se detecta colisiones y se ayuda a determinar la dinámica. A las figuras construidas y a la interacción entre ellas se denomina mundo háptico.

El primer objeto a crearse en el mundo háptico es una esfera que está asociada a la posición del dispositivo e interactúa con los demás objetos. Se elige una esfera ya que al ser una figura primitiva no genera mucha carga computacional. Si se decide escoger otro objeto más complejo es necesario cambiar la función y considerar la carga computacional que implique la complejidad del mismo.

Emulación de Pesos

En la clase Falcon Interface que se describe en 2.2.1 se definen dos funciones para envío del valor de fuerza al dispositivo háptico. Apply Force, es la función que aplica un valor de fuerza constante por un periodo de tiempo. La otra función es Set Force Field, aquí se aplica un valor de fuerza constante mientras no se actualice su valor. Ambas funciones requieren un array de 3 dimensiones uno para cada eje para la emulación de pesos se utilizará estas funciones dependiendo del requerimiento.

Realimentación de Fuerza en Colisiones

Dentro de la clase Falcon Interface Class descrita en 2.2.1 se configura los valores iniciales del objeto virtual asociado al movimiento del dispositivo (esfera) que se creará en mundo háptico como la escala, fuerza inicial y máxima. Este objeto virtual tiene asociadas dos esferas, una que se maneja con el valor de posición en crudo del dispositivo llamada TipObject y otra a la que se aplica un tratamiento al valor de posición para sea más estable y es la que vea el usuario, se le denomina GodObject.

Cuando se activa la bandera de colisiones se determina la fuerza bajo el principio de la fuerza elástica que se observa en la ecuación 2.1.

$$F = -k \cdot x \quad (2.1)$$

En donde:

x : Representa la distancia entre la posición actual con respecto a la anterior,

k : La constante elástica o de amortiguamiento

F : La fuerza de empuje

Si el GodObject está estático implica que hay una colisión en proceso con otro objeto, pero eso no quiere decir que el usuario no haya aplicado una fuerza mayor modificando así la posición del TipObject como se ve en la Figura 2.9. Para este caso una fuerza de empuje es calculada. Esta debe aumentar con respecto al movimiento del TipObject, por ello usa un valor de velocidad obtenido de la resta la posición del Tip con respecto al GodObject para un valor de tiempo. Esta velocidad se multiplica por una constante negativa y se suma al valor de la fuerza ya calculada.

Al final se tendrá una fuerza total correspondiente a la fuerza de empuje más la fuerza fija como muestra la ecuación 2.2. Está ecuación consta de dos partes, la primera parte es una sumatoria que depende de la velocidad del movimiento del dispositivo y una constante. Por lo tanto, si el dispositivo se mantiene estático la fuerza total es representada por la fuerza elástica que se tiene en la ecuación 2.1.

$$F_{total} = \sum c \cdot \left(\frac{x_{tipobject} - x_{godobject}}{\Delta T} \right) - k \cdot x \quad (2.2)$$

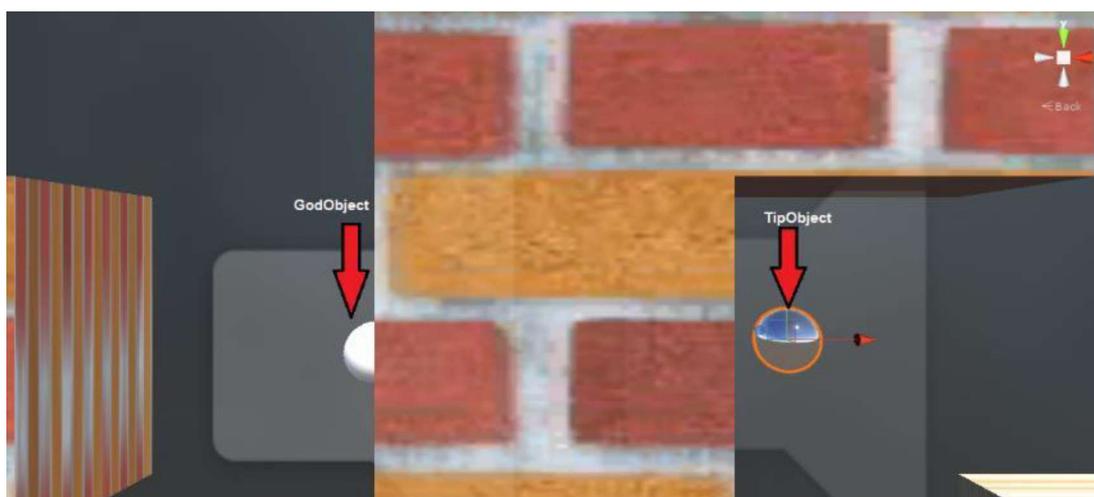


Figura 2.9 Diferencia de entre GodObject y TipObject

Detección de colisiones y mallas

Una de las funciones más utilizada es la detección de colisiones. A continuación, se detallan los componentes necesarios en la colisión de dos objetos como colliders y rigidbody.

Colliders (mallas) se llama al área de colisión de un objeto. Las mallas se componen de triángulos para recrear la figura del objeto virtual como se observa en la Figura 2.10. Los vértices de cada triángulo se almacenan en una sola matriz. Unity 3D posee varias clases de mallas preestablecidas, como: cubo, esfera, cilindro, esfera y mesh. Las primeras tres

son consideradas mallas primitivas, debido a que consume una menor cantidad de recursos, ya que contienen un menor número de triángulos. La malla denominada mesh se adapta de mejor manera a la forma del objeto virtual, pero conlleva una mayor carga computacional porque se emplea un mayor número de triángulos, dependiendo de la complejidad de la forma del objeto virtual. Por este motivo, se recomienda utilizarla de forma limitada [38].

Rigidbody es un componente que brinda a un objeto virtual características como: masa, gravedad, fricción, resistencia al aire, etc. Para que los objetos se relacionen entre sí es necesario que al menos uno tenga esta propiedad, caso contrario, no se detecta la colisión.

La colisión se detecta cuando una parte de las mallas de los dos objetos se sobreponen. En los scripts se programan las acciones cuando se produce la colisión, hay dos métodos para tratar las colisiones. En el primero es una función que se llama cuando el objeto que posee el script colisiona con cualquier otro. En el segundo se usa un trigger que es un disparador que se activa cuando se produce la colisión en un área restringida.

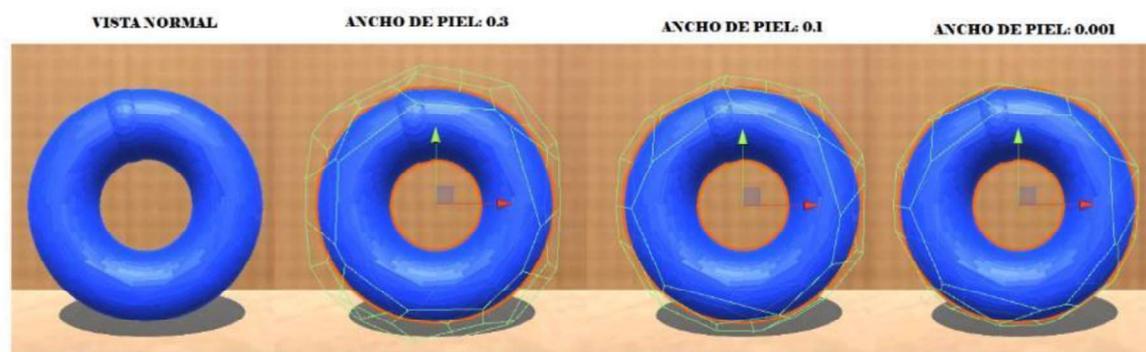


Figura 2.10 Mallas de colisiones para esta figura

2.2.4.1 Ejercicios

Para este proyecto se desarrollaron 4 tipos de ejercicios, cada uno con 3 niveles de dificultad. El primer ejercicio motriz muestra distintos laberintos por los que el paciente tendrá que movilizarse sin colisionar contra las paredes; para esto, el paciente trabajará principalmente los movimientos de aducción y abducción con la muñeca, además de flexión de dedos y agarre tridigital o prensión. El segundo ejercicio motriz mostrará distintos rompecabezas que deberán ser armados correctamente por los pacientes. En este ejercicio se trabajará principalmente la flexión, extensión y circunducción de la muñeca, a más del agarre tridigital. El tercer ejercicio motriz mostrará distintas paredes con marcas que deberán ser taladradas por el paciente. En este ejercicio se trabajará principalmente el movimiento de extensión isométrico de la muñeca que ayuda a la recuperación de la

musculatura y el movimiento de circunducción. El cuarto y último ejercicio mostrará distintos escenarios en los que el paciente deberá colocar diferentes objetos virtuales en el lugar indicado, trabajando todos los movimientos propuestos que son: extensión y flexión junto con desviaciones radial y cubital, también el agarre tridigital.

2.2.4.2 Primer ejercicio motriz: Laberintos

La dinámica general del ejercicio es que el paciente ingrese en un laberinto y recoja las monedas lo más rápido posible y con la menor cantidad de choques. Como todos los ejercicios motrices desarrollados en este proyecto se utilizarán objetos 3D que serán creados en el software de diseño Blender, estos objetos serán exportados en formato .fbx u .obj. A continuación, se muestran los objetos virtuales correspondientes a los laberintos desarrollados para los distintos niveles del primer ejercicio motriz en la Figura 2.11.

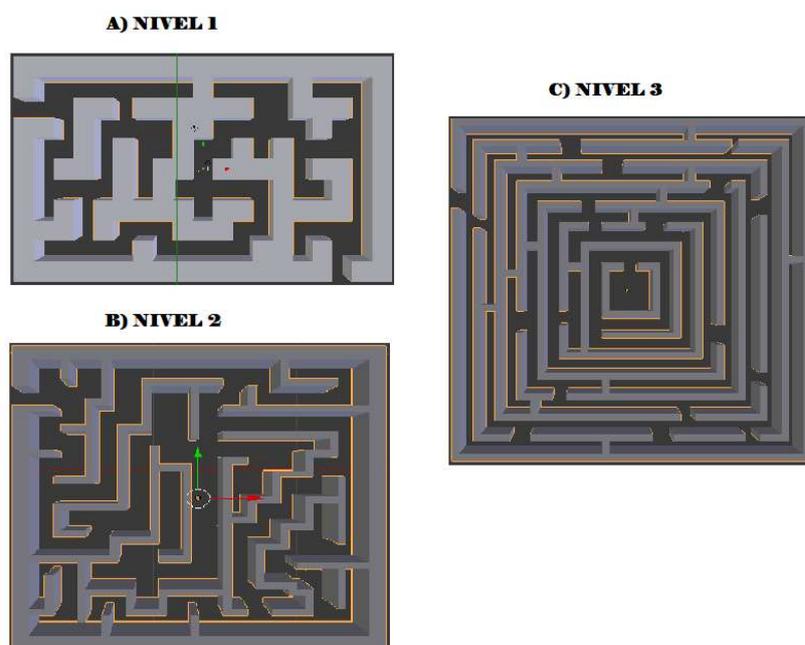


Figura 2.11 Laberintos 3D creados en Blender para cada nivel

Una vez establecidos los objetos virtuales que se utilizarán para construir la escena son importados a la escena donde pueden ser escalados, rotados, movidos a conveniencia y mediante código se definen las acciones que se llevaran a cabo cuando el paciente interactúe con ellos.

Cuando todos los objetos 3D están ubicados se agrega la dinámica de este ejercicio en diferentes scripts. Estos contienen toda la información sobre cómo se comportarán todos los objetos virtuales, dependiendo de las acciones del paciente, para tener una dinámica

completa. Estas acciones son, en su mayoría, visuales; sin embargo, también existen objetos que deben interactuar de forma háptica con el paciente, en este ejercicio son los distintos laberintos.

Para lograr esta realimentación de fuerza se debe añadir las propiedades hápticas a cada uno de estos objetos, a través de distintos scripts que han sido desarrollados dependiendo de la dinámica del ejercicio. En general, estos scripts permitirán agregar propiedades a los objetos como: masa, fricción, rotabilidad o movilidad, estas características se visualizan en la Figura 2.12.

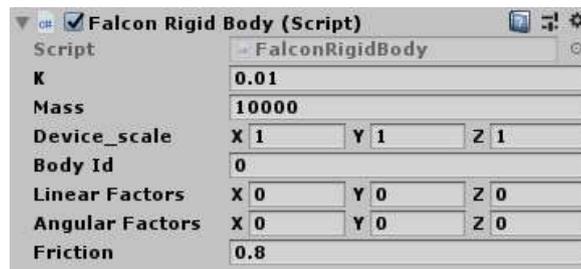


Figura 2.12 Propiedades hápticas configurables

En este ejercicio motriz cuando el paciente haya ingresado en el laberinto será capaz de sentir las colisiones contra las paredes y la interfaz llevará un conteo del número de choques. Para el funcionamiento de esta escena existen zonas invisibles: la zona de ingreso y las zonas de llegada. La zona de ingreso utiliza el sistema de colisiones para detectar cuando el paciente ha entrado en el laberinto creando, de esta manera, una puerta que le impide la salida y empezando a contabilizar los choques y el tiempo que el paciente se demora en finalizar el nivel. Las zonas de llegada son invisibles y se encuentran en los distintos puntos de llegada ubicados dentro de los laberintos, los cuales están marcados por monedas 3D que giran continuamente.

Una vez que estas zonas detectan la colisión con la esfera (puntero del dispositivo háptico), dependiendo del nivel, realizan distintas acciones. En el nivel uno y tres finaliza el nivel deteniendo el conteo de errores y tiempo, aplicando una fuerza sobre el dispositivo háptico. En el caso del nivel dos, al detectar una colisión con la primera zona de llegada, esta se destruye y aparece una segunda zona con una segunda moneda que debe ser recogida. Cuando esto sucede, finalmente se detiene el conteo de errores y el tiempo; de igual manera, se aplica una fuerza sobre el dispositivo.

En este ejercicio el Canvas se conforma de tres distintos paneles que se muestran en distintas etapas del ejercicio. El panel inicial, Figura 2.13, mostrará el título de la escena

junto con las instrucciones generales del nivel y del estado del dispositivo háptico. Mientras este panel esta visible, el dispositivo háptico se posicionará para que las condiciones de la escena se ejecuten correctamente. Para avanzar al siguiente panel y dar inicio al nivel se deberá presionar la tecla acoplada en el eje de presión fina.

Una vez presionado el botón se destruirá el panel de instrucciones y se mostrará el panel de la interfaz general que tendrá información sobre el proceso del ejercicio. En este punto aparecerán dos tiras en la parte inferior izquierda con la información del número de choques y el tiempo que se ha demorado el paciente desde que entró en el laberinto, estas tiras se pueden observar en la Figura 2.14.

Además, para este ejercicio, la cámara sigue al puntero del dispositivo háptico por lo que se mueve durante la ejecución, para tener una vista general del laberinto se ha agregado una vista superior estática de la escena en la esquina inferior derecha. Una vez que el paciente haya recogido las monedas correspondientes a cada nivel, este panel se destruirá y se muestra el último panel que presenta una imagen del juego finalizado con un resumen de los errores y el tiempo que el paciente demoró en finalizar el laberinto, este panel se puede observar en la Figura 2.15.

Adicionalmente, en los niveles uno y dos, se muestran dos botones: uno de salir de la interfaz al menú y otro de ir al siguiente nivel. Y en el tercer nivel solo se encuentra un botón para salir al menú. En este panel también existe el comando para guardar los datos de la sesión.



Figura 2.13 Panel de instrucciones del primer ejercicio



Figura 2.14 Panel de juego del primer ejercicio motriz



Figura 2.15 Panel de final de nivel del primer ejercicio

El desarrollo de cada uno de los niveles de este ejercicio se enfocó en ir disminuyendo el ancho entre las paredes, obligando al paciente a tener una motricidad más fina en cada nivel. Las trayectorias se vuelven más complejas y, en el segundo nivel al tener dos puntos de llegada, se obliga al paciente a realizar un esfuerzo extra, ya que debe atravesar dos veces el laberinto para recoger las monedas. Los distintos laberintos ya introducidos en Unity 3D, con una trayectoria sugerida, se encuentran en la Figura 2.16, Figura 2.17 y Figura 2.18. Estos cambios en los niveles se desarrollaron para que le paciente trabaje su motricidad fina, moviéndose por el laberinto y su precisión debe ser mayor a medida que realiza los distintos niveles.

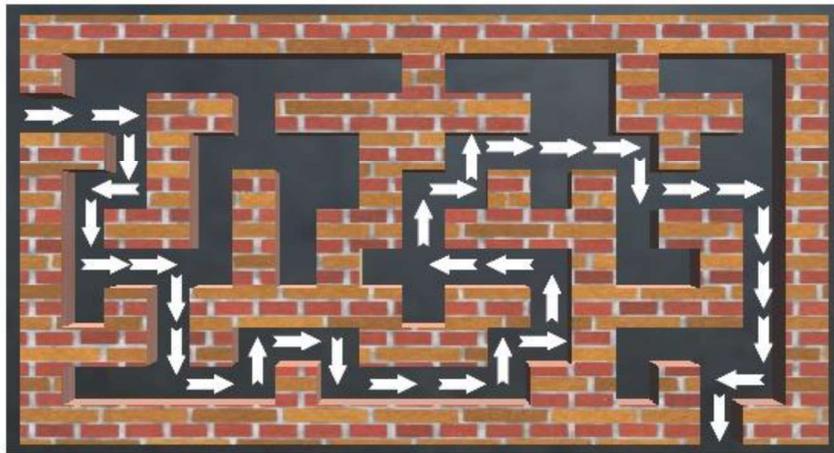


Figura 2.16 Solución sugerida laberinto nivel 1

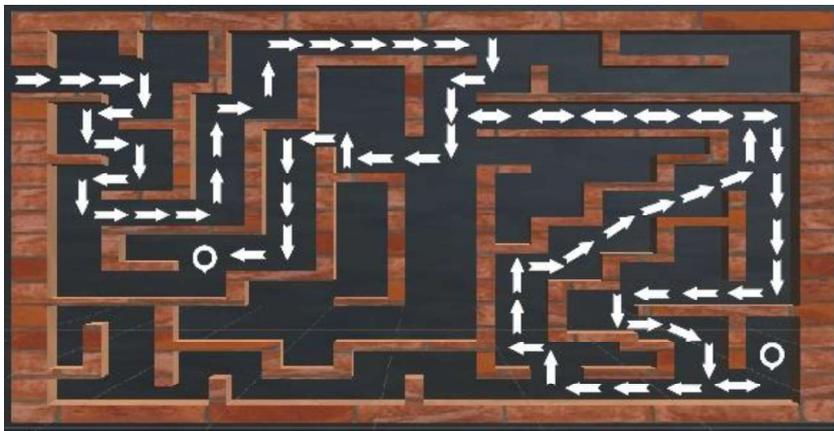


Figura 2.17 Solución sugerida laberinto nivel 2



Figura 2.18 Solución sugerida laberinto nivel 3

El funcionamiento de este ejercicio motriz está detallado en el diagrama de flujo de la Figura 2.19, donde se describe cómo funcionan los 3 niveles: el primer y tercer nivel solo poseen una moneda en la zona de llegada; mientras que el nivel dos posee dos zonas de llegadas que deben ser colisionadas con el puntero.

Para la correcta implementación de este ejercicio se tomaron algunas consideraciones como:

Debido a que este ejercicio solo utiliza dos dimensiones para funcionar, se limitó el movimiento del eje Z del dispositivo, para esto se implementó una barrera invisible con propiedades hápticas a la altura del laberinto. Cuando el usuario desbloquea el dispositivo se crea una última barrera que cubre al laberinto restringiendo la movilidad en el eje Z.

Debido a problemas de procesamiento o una mala ubicación del dispositivo por ignorar las alertas de no tocarlo, este puede iniciar en una posición incorrecta en los niveles de los laberintos. Para corregir este error solo se debe reiniciar la escena, dando el espacio necesario al dispositivo para que se posicione con libertad.

En la dinámica de cada nivel cuando se produce una colisión entre el puntero y alguna pared del laberinto, se genera una realimentación de fuerza que permite al paciente sentir el choque de forma háptica en el mundo real.

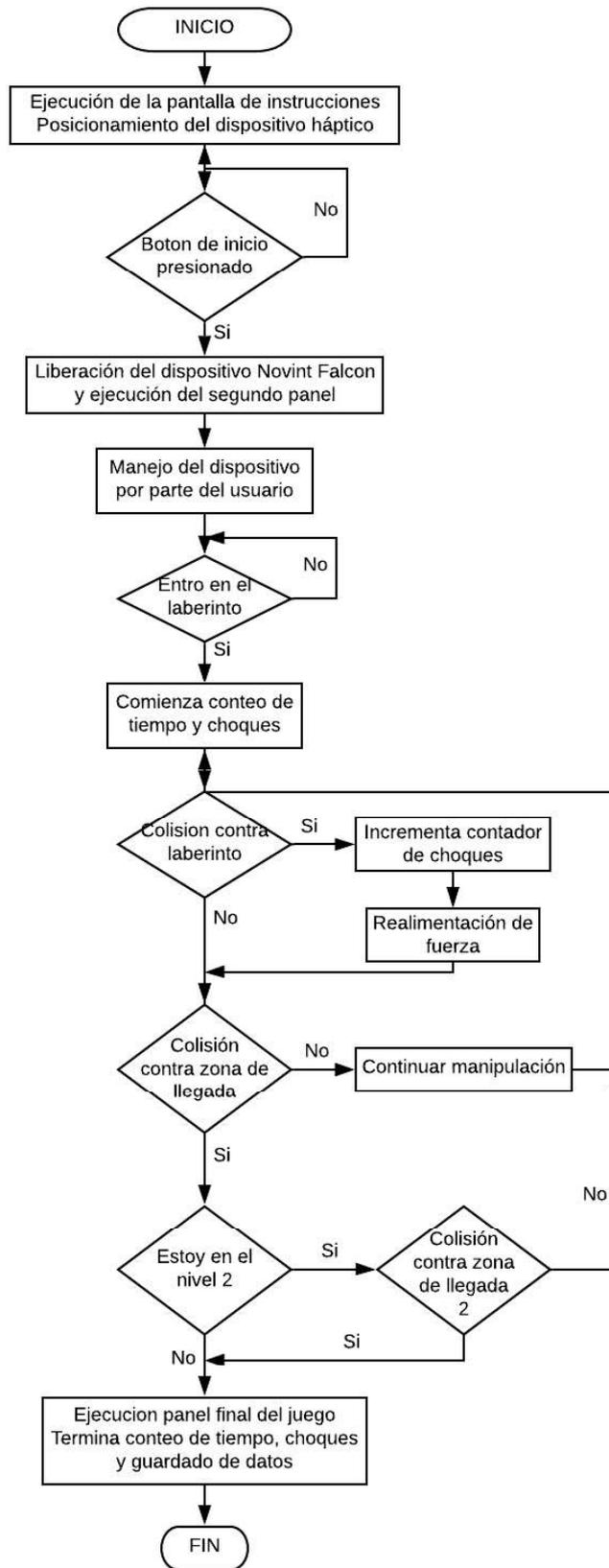


Figura 2.19 Diagrama de flujo del primer ejercicio motriz: Laberintos

2.2.4.3 Segundo ejercicio motriz: Rompecabezas

El objetivo de este ejercicio motriz es que el usuario se mueva en los tres grados de libertad del dispositivo, realizando movimientos de la muñeca de flexión, extensión, desviación cubital y desviación radial. Como el nombre del ejercicio lo indica, se presentará en la interfaz del usuario las piezas de un rompecabezas como objetos virtuales principales del juego. La dinámica del ejercicio es la resolución de un rompecabezas evitando equivocarse, en el menor tiempo posible y con una variación de peso configurable. Las piezas fueron diseñadas en el software Blender y con sus herramientas se añadió como textura una imagen sobre las piezas para emular a un rompecabezas. En la Figura 2.20 se muestran el rompecabezas diseñado en el software Blender.

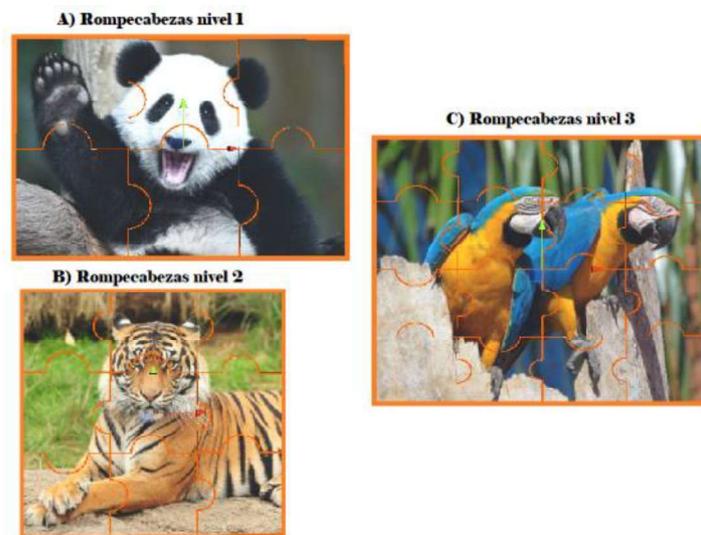


Figura 2.20 Rompecabezas 3D creados en Blender para cada nivel

El espacio de trabajo para este ejercicio se desarrolla en tres dimensiones. En la parte frontal se dispondrán las piezas en ubicaciones específicas, pero de manera aleatoria. En la parte posterior se mostrará el marco que contiene una guía y una zona de detección con las formas de las piezas, con el fin de ayudar al usuario a colocar las piezas en el lugar correcto; además se muestra una miniatura del rompecabezas como un medio de ayuda. En la Figura 2.21 se muestra un ejemplo de un marco de rompecabezas con sus respectivas guías y zona de llegada. Para los demás niveles se usa una variación de cada una de las figuras diseñadas para efectuar este ejercicio.



Figura 2.21 Marco de rompecabezas con guías y zonas de llegada

En el Canvas principal, Figura 2.22, se coloca los paneles de instrucciones, del fin del ejercicio y del ejercicio como tal. El panel del ejercicio, Figura 2.23, se muestra el tiempo transcurrido, número de errores, un slider de ocho niveles que equivalen a valores preestablecidos de fuerza que se aplicarán sobre las piezas del rompecabezas. También constan indicadores de texto para mostrar al usuario el modo de operación. Existen dos modos de operación denominados observar y agarrar, los cuales son intercambiables al presionar un botón. El modo observar permite al usuario moverse por todo el espacio de trabajo. El modo agarrar permite al usuario coger la pieza cuando se acerca a ella y soltarla al presionar el botón. A continuación, se presentan los tres paneles correspondientes a cada nivel del ejercicio motriz.



Figura 2.22 Panel de instrucciones del segundo ejercicio

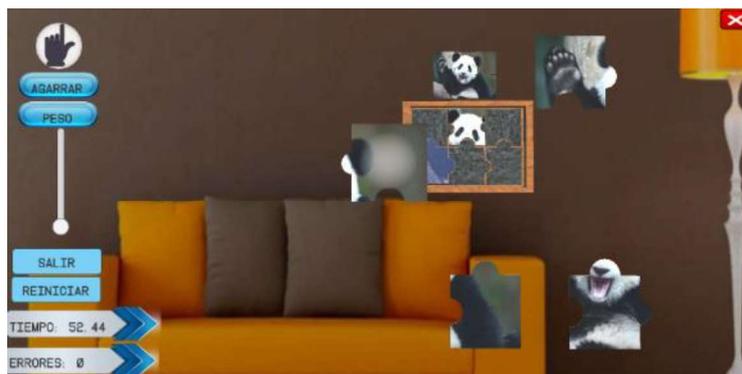


Figura 2.23 Panel de juego del segundo ejercicio



Figura 2.24 Panel de final de nivel del segundo ejercicio

Funcionamiento principal del ejercicio motriz

El funcionamiento general se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.28. Este ejercicio consta de tres niveles de dificultad y la variante en cada uno es el número de piezas del rompecabezas.

Como se muestra en el diagrama de flujo, al comienzo se realiza la inicialización de las variables en cada script y el posicionamiento de los objetos virtuales en la escena. Las piezas de los rompecabezas se ubican en posiciones específicas, pero de manera aleatoria para que, cada vez que se abra la escena las piezas cambien su orden de distribución. En el nivel 1 y 2, Figura 2.25 y Figura 2.26, las piezas se ubican en una posición específica en el plano Z y, en el nivel 3, Figura 2.27, se ubican en las posiciones fijas del plano Z. También se realiza la apertura de la comunicación con el dispositivo háptico y su posicionamiento. Por último, el usuario al abrir la escena observará un panel que muestran las instrucciones del juego. Este panel se muestra por un tiempo de 15 segundos para luego dar paso a la ejecución del juego.

En la ejecución del juego, el usuario observará las piezas de rompecabezas y podrá moverse a través del área de trabajo mediante la esfera asociada a la posición del dispositivo mientras se encuentre en el modo observador. Si el usuario desea coger una pieza debe presionar el botón para cambiar al modo agarrar y acercarse a la pieza que desee seleccionar. Cuando se detecta la colisión, la pieza cambia de lugar con la esfera y el usuario es capaz de moverla por el espacio de trabajo y sentirá la fuerza aplicada sobre esta.

Al momento en que el usuario acerque la pieza al marco, con las guías del rompecabezas, se detectará la colisión entre esta pieza con las guías y se iluminarán las zonas de detección de cada pieza. Para soltar la pieza el usuario debe presionar el botón y la pieza se colocará en el lugar de la zona iluminada. Si la pieza colocada está en el lugar correcto se aumenta el contador de aciertos, pero si por el contrario, la pieza está en el lugar incorrecto se aumenta el contador de errores. En cada caso el usuario escucha una realimentación.



Figura 2.25 Interfaz de usuario del nivel 1 Segundo ejercicio



Figura 2.26 Interfaz de usuario del nivel 2 Segundo ejercicio



Figura 2.27 Interfaz de usuario del nivel 3 Segundo ejercicio

Durante el transcurso del ejercicio se podrá visualizar en el lado izquierdo el tiempo, el número de errores, un slider con el cual se puede variar la fuerza y el texto que indica el modo de operación. La cámara se encuentra asociada al movimiento del dispositivo háptico, por lo que se mueve cuando el usuario lo hace y así se consigue tener un mayor espacio de trabajo.

Cuando se comprueba que todas las piezas han sido colocadas en el lugar adecuado se muestra un panel que contiene el mensaje de finalización del ejercicio. Además, aparece el tiempo transcurrido, el número de errores cometidos, los botones para regresar al menú o continuar al siguiente nivel, dependiendo del nivel.

El desarrollo de cada uno de los niveles de este ejercicio se enfocó en ir aumentando el número de piezas para que el usuario realice un mayor movimiento de la articulación y, al tener una fuerza variable, se obliga a realizar un esfuerzo extra ya que ejercita la musculatura.

El mayor contratiempo a solventar fue la gran cantidad de objetos virtuales que maneja cada escena, principalmente cada una de las piezas de sus rompecabezas, sus referencias y sus zonas de llegada. Para lograr una correcta detección de las piezas, cada una fue etiquetada con un número ascendente desde el 1 y cada una de las zonas de llegada en las que debían depositarse fue etiquetada con un prefijo más un número, igualmente ascendente desde el 1. De esta manera, cuando un paciente suelta una pieza se comparan los números de estas etiquetas para comprobar si está en el lugar correcto y contar un acierto o si está en una posición errónea o nula y contar un error.

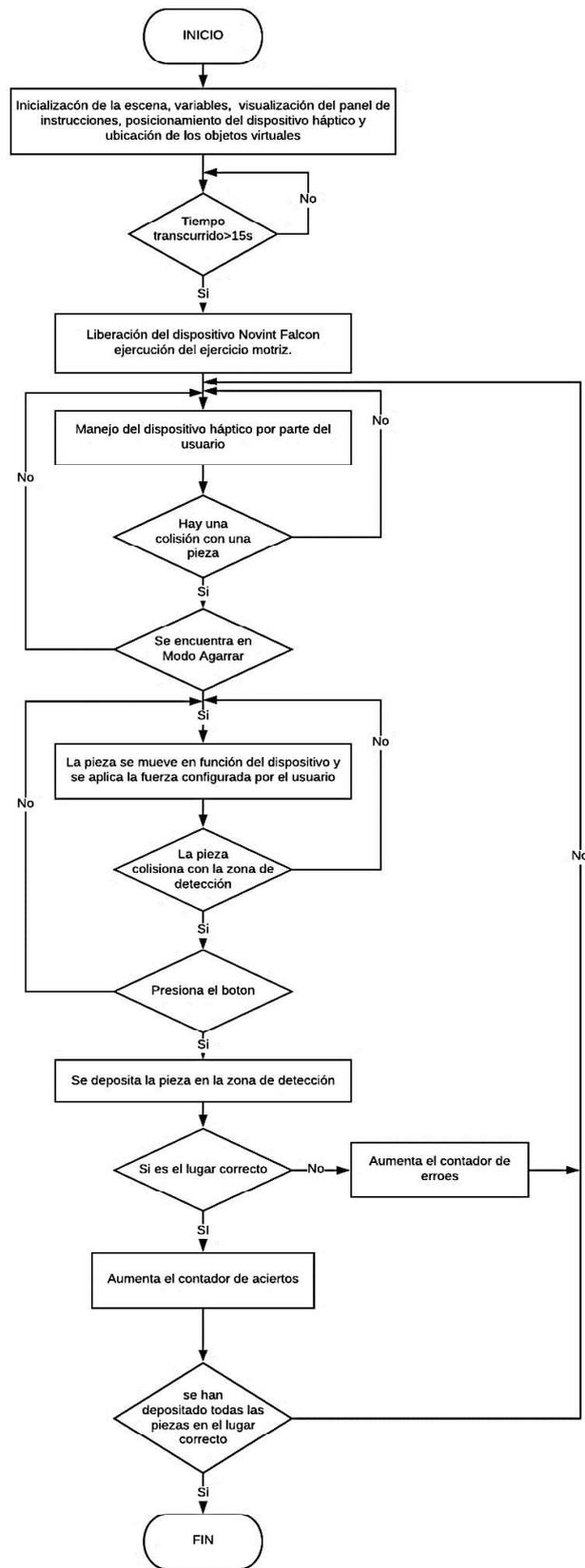


Figura 2.28 Diagrama de flujo del segundo ejercicio motriz: Rompecabezas

2.2.4.4 Tercer ejercicio motriz: Taladros

La dinámica general del ejercicio es que el paciente taladre una pared en los distintos puntos marcados con la ayuda de un taladro que permite el movimiento en tres dimensiones y cambia de tamaño. El ejercicio debe realizarse en el menor tiempo posible y evitando tocar las zonas de la pared que no se encuentran marcadas. En este ejercicio motriz, los objetos 3D desarrollados en el software de diseño Blender, corresponden principalmente a las paredes donde se realizará el taladrado y las dianas que indicarán el lugar correcto donde se debe ejercer presión. Además, para complementar la ambientación de este ejercicio se descargó de Internet un modelo 3D de un taladro y una broca. En la Figura 2.29 se muestran los objetos virtuales correspondientes a este ejercicio motriz para los distintos niveles.

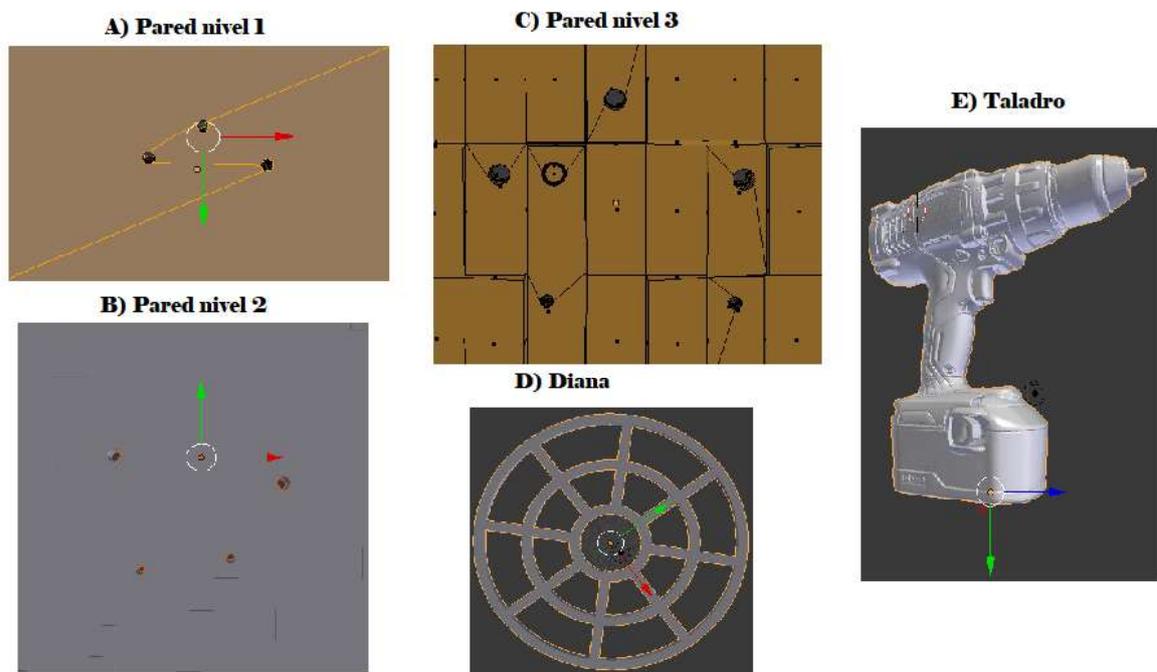


Figura 2.29 Objetos 3D utilizados en las escenas del segundo ejercicio motriz

Una vez importados en Unity 3D, los objetos virtuales utilizados para construir las escenas son colocados en las escenas. Cada nivel manejará una pared distinta que tendrá 3, 4 o 5 agujeros preestablecidos, correspondientes al nivel 1, 2 y 3. De esta manera, cada uno tendrá 3, 4 o 5, dianas rojas y verdes que indicarán donde se debe taladrar y cuáles huecos ya han sido taladrados correctamente. Para saber qué huecos han sido taladrados, el sistema usa un cubo movable y una zona de llegada en cada hueco.

En el tercer ejercicio motriz, cada uno de los cubos movibles usa scripts con propiedades hápticas para que el usuario sienta realmente el esfuerzo al realizar el agujero. Además,

los scripts determinan si el tamaño de la broca es el adecuado para taladrar, en caso contrario, los cubos restringen su movilidad hasta que el usuario utilice el tamaño de broca correcto. Las paredes virtuales, de igual manera, tienen propiedades hápticas para que el paciente sienta el choque contra ellas y así contabilizar el número de choques que el paciente haga fuera de las dianas.

Para el funcionamiento de esta escena las paredes, cubos, brocas y zonas invisibles de llegada tienen una malla que permite detectar todas las colisiones. Las zonas de llegada son cubos invisibles ubicados a distintas profundidades de las paredes.

Una vez que estas zonas detectan la colisión con el cubo movable incrementan un contador de aciertos, representado por medallas en la interfaz. Según el nivel de aciertos tendrá los valores de 3, 4 o 5, correspondientes al número de huecos del nivel. Cuando este contador llega a su valor tope se detiene el tiempo y el conteo de errores.

Al igual que los demás ejercicios motrices se utilizan tres paneles. El panel de instrucciones,

Figura 2.30, muestra la información de lo que el paciente junto con la cuenta regresiva que indica el tiempo que falta para que el dispositivo háptico se libere. Una vez que la cuenta llega a cero se mostrará el panel de la interfaz general o ejercicio, Figura 2.31. Aquí se muestra el tiempo transcurrido, el número de choques contra la pared y, como en el segundo ejercicio, se tiene un slider con ocho posiciones que son interpretados como ocho diferentes niveles de peso que se aplican sobre el taladro. Además, en la esquina superior derecha se tienen medallas que se irán activando conforme se realicen los hoyos y en la esquina superior izquierda, se encuentra en el nivel 2 y 3 una barra con la información de la broca que se está usando en ese momento. Cuando el paciente haya realizado los hoyos en cada nivel aparecerá el panel de final de juego con los botones de salir y siguiente nivel, Figura 2.32.



Figura 2.30 Panel de instrucciones del segundo ejercicio

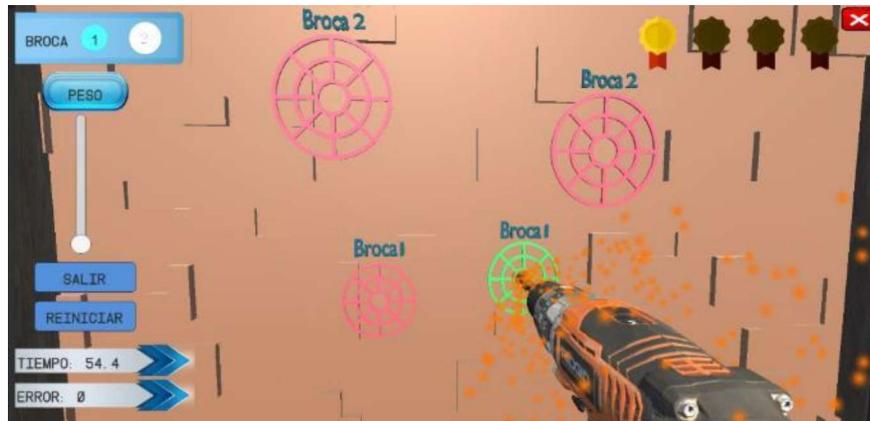


Figura 2.31 Panel de juego del segundo ejercicio



Figura 2.32 Panel de final de nivel del segundo ejercicio

El desarrollo de los niveles de este ejercicio se enfocó en ir disminuyendo el diámetro de los agujeros en las paredes permitiendo al paciente trabajar su precisión motora. Así mismo, los cubos movibles poseen distintas masas dentro de un rango similar para que el paciente trabaje su musculatura al empujar estos cubos, simulando la perforación en la pared.

En este ejercicio, los niveles dos y tres poseen dos tamaños distintos de broca y, por tanto, de agujeros. Esto con la finalidad de forzar al paciente a introducir un objeto más pequeño en un área aún menor para buscar una mayor precisión. En caso de que el paciente taladre la pared con una broca incorrecta, el cubo movible permanecerá quieto. En la Figura 2.33, Figura 2.34 y Figura 2.35 se observa las interfaces de cada nivel de este ejercicio.



Figura 2.33 Interfaz de usuario del nivel 1 Tercer ejercicio



Figura 2.34 Interfaz de usuario del nivel 2 Tercer ejercicio



Figura 2.35 Interfaz de usuario del nivel 3 Tercer ejercicio

El funcionamiento de este ejercicio motriz está detallado en el diagrama de flujo de la Figura 2.36, donde se establece que, una vez iniciado el nivel, la realimentación de fuerza se da

en varios escenarios como el choque contra paredes o contra el agujero con una broca incorrecta.

En el caso del nivel 2 y 3 se tienen dos tamaños de broca que se pueden intercambiar por medio del botón del eje de presión fina. Entre las problemáticas más notables para el desarrollo de este ejercicio se encontró la creación de las paredes 3D con los agujeros y la creación de la ambientación, tanto háptica como visual y auditiva para simular el taladrado de una pared.

Entre las posibles mejoras que se pueden realizar sobre el ejercicio está la inclusión de más agujeros de distintos tamaños que permitan al paciente trabajar más su precisión con objetos pequeños. También se puede unificar las zonas de llegada de cada agujero a una zona general para reducir el total de objetos 3D que se encuentran en la escena.

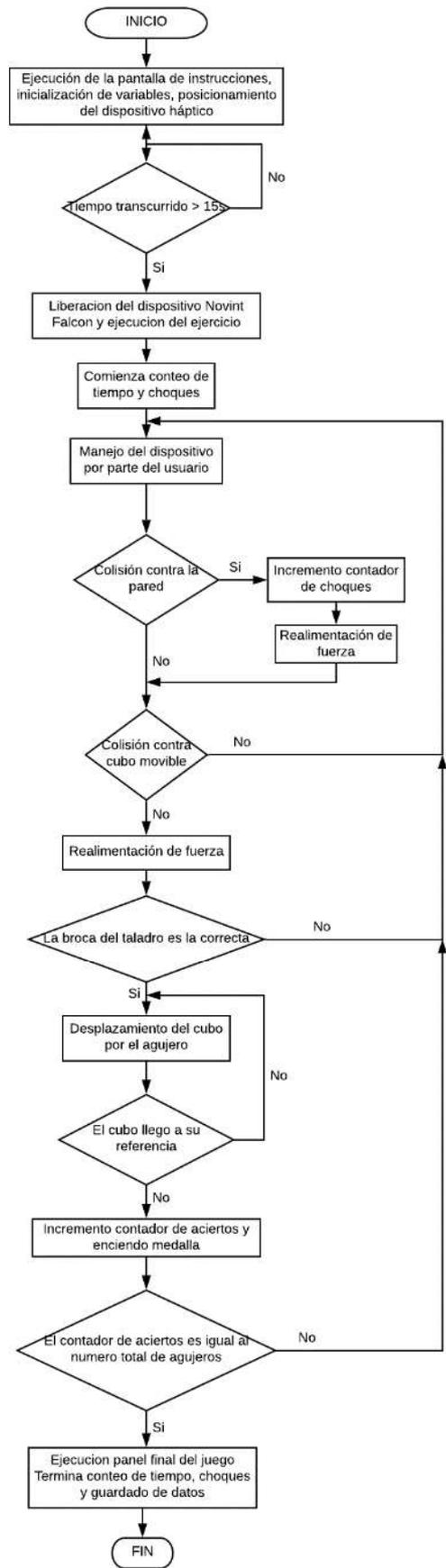


Figura 2.36 Diagrama de flujo del tercer ejercicio motriz:

2.2.4.5 Cuarto ejercicio motriz: Consultorio

El objetivo de este ejercicio motriz es que el usuario se mueva en los 3 grados de libertad del dispositivo y realiza los movimientos de la muñeca de flexión, extensión y con un mayor énfasis en los de desviación cubital y desviación radial. Estos ejercicios se basan en otros que son comerciales, como se observa en la Figura 2.37.

La dinámica del ejercicio consiste en que el usuario coloque la mayor cantidad de piezas en el lugar correcto, en un tiempo establecido. Este ejercicio si diferencia de los anteriores porque el usuario, al coger una pieza, recibe una realimentación de fuerza en cada uno de sus bordes. Las piezas escogidas para este nivel son figuras básicas para evitar una mayor carga computacional. También se usa una caja con marco, en donde se colocarán las piezas. Cabe resaltar que todos los objetos fueron diseñados en el software Blender y con sus herramientas se añadió textura y se unió las figuras para obtener el resultado final.

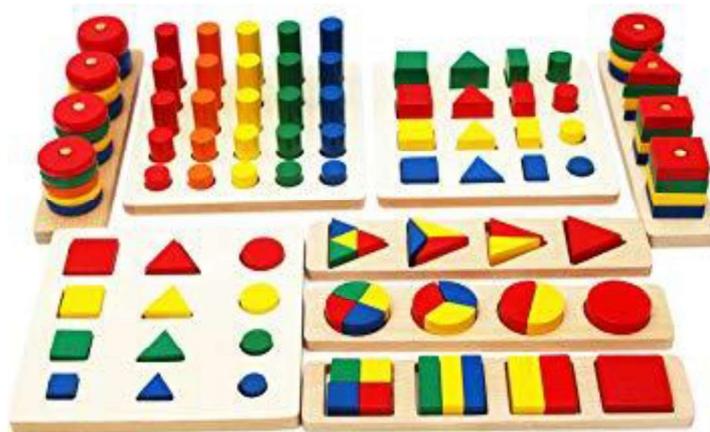


Figura 2.37 Sistemas utilizados para realizar terapias de movilidad

El espacio de trabajo para este ejercicio tiene tres dimensiones. En los niveles 1 y 2, la escena tiene como fondo un salón, en el centro se muestra una mesa con una zona de detección y es capaz de generar una realimentación de fuerza. En el nivel 1, sobre la mesa en el lado izquierdo se coloca una caja con figuras que permite la instanciación (creación) de una figura en un orden, peso y color aleatorio; en el lado derecho, se tiene el marco con las guías donde se debe depositar las figuras, en cada guía se tiene una zona de detección que ayudará a detectar las colisiones. En Figura 2.38 se muestra las figuras y las guías de estos dos niveles.

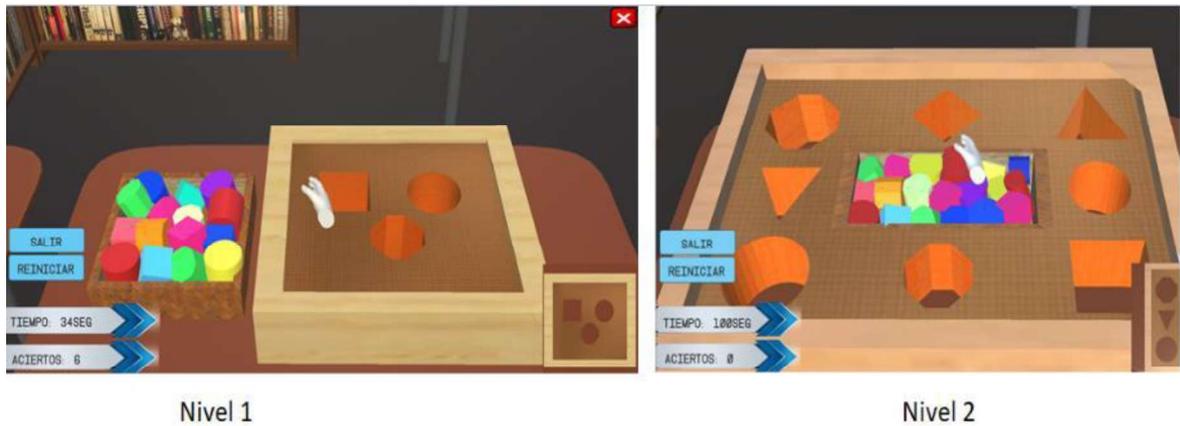


Figura 2.38 Marcos guías y figuras de los Nivel 1 y 2

En el nivel 3, la dinámica y el fondo se mantienen, pero con una variación: sobre la mesa está una base con palillos de diferentes colores y se utilizan figuras en formas de donas (también de diferentes colores) que se deben colocar en el palillo indicado. Cuando la figura se deja en el lugar indicado se mostrará todas las figuras depositadas. En cada uno de los palillos hay zonas de detección para determinar si se colocó la pieza en el lugar correcto, una zona para detectar el choque con la mesa, y una zona límite para poder soltar la pieza.

En la escena se manejan 8 objetos virtuales que son perceptibles a través de la realimentación de fuerza, si se contabiliza las zonas de detección y demás objetos virtuales se manejan alrededor de 30 objetos virtuales de manera continua. Esto causa una gran carga computacional. En la Figura 2.39 se muestra la distribución de los objetos virtuales de la escena

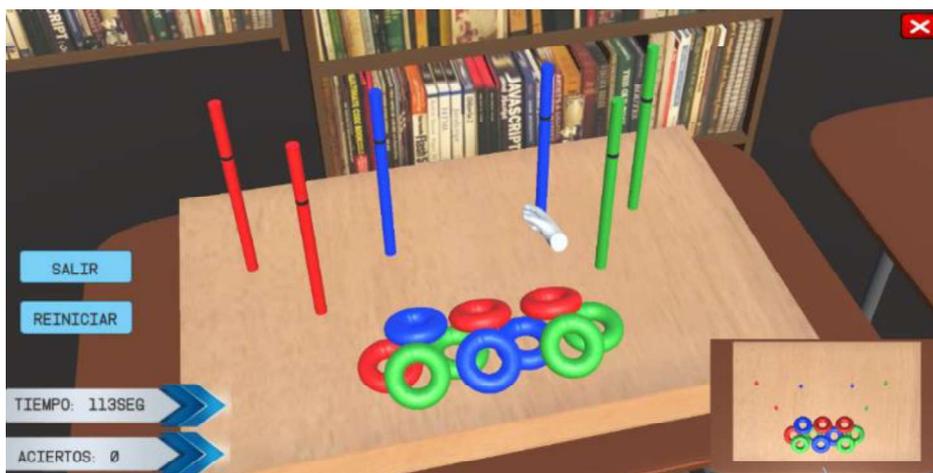


Figura 2.39 Distribución de los objetos en el Nivel 3

En el Canvas principal se colocan los paneles de instrucciones, fin del ejercicio y del ejercicio. El panel del ejercicio se muestra el tiempo transcurrido, el número de figuras colocadas en el lugar correcto. También tiene indicadores de texto en el nivel 3 que señalan el límite para depositar la pieza. El modo observar, permite al usuario moverse por todo el espacio de trabajo. El modo agarrar posibilita al usuario coger la pieza cuando se acerca a ella y soltarla al presionar el botón.

Funcionamiento del Nivel 1 y Nivel 2

El funcionamiento general de los niveles 1 y 2 se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.44. La variante consiste en que, en cada nivel, se incrementa el número de figuras de tamaños diferentes (grandes y medianos).

Como se muestra en el diagrama de flujo, el ejercicio comienza con la inicialización de las variables en cada script. Luego, se realiza la apertura de la comunicación con el dispositivo háptico y su posicionamiento. El usuario, al abrir la escena, observará un panel donde se muestran las instrucciones del juego Figura 2.40. Este panel aparece por un tiempo de 15 segundos para luego dar paso a la ejecución del juego. A los 5 segundos se realiza la ubicación de los objetos virtuales en la escena para permitir el correcto posicionamiento del dispositivo.

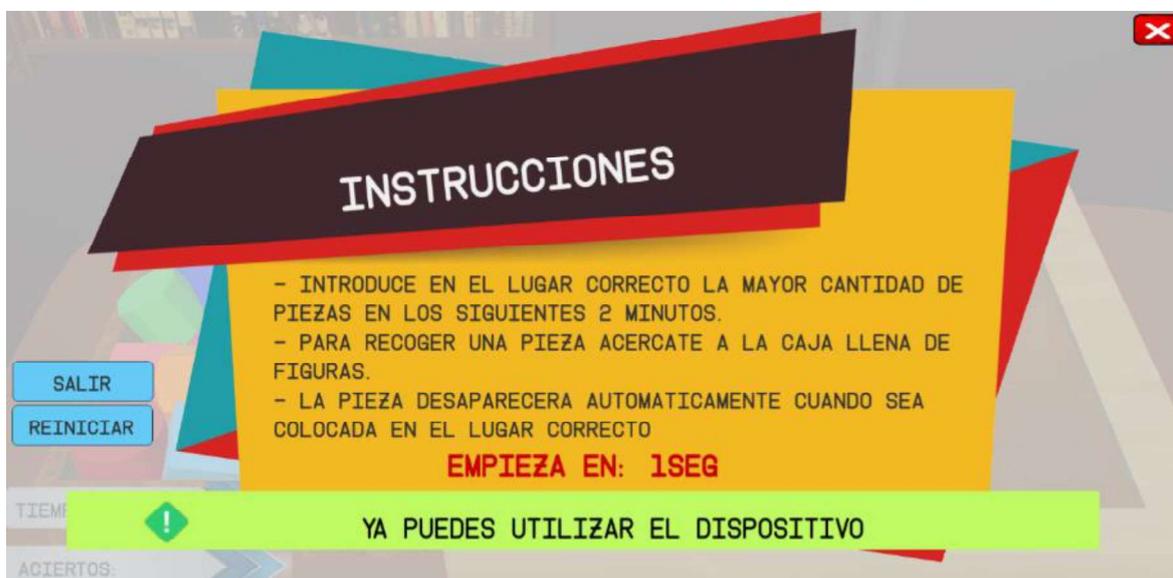


Figura 2.40 Panel de Instrucciones del Ejercicio Consultorio

La ejecución del ejercicio dura dos minutos. Durante este periodo el usuario podrá moverse a través del área de trabajo, mediante una esfera asociada a la posición del dispositivo que esta recubierta por una mano. Si el usuario desea coger una pieza debe acercarse a la

caja de figuras. Cuando se detecta la colisión, la esfera se recubre con la forma de la pieza, se configura un peso de valor aleatorio y el usuario puede mover la pieza por el espacio de trabajo y sentir la fuerza cuando los bordes de la figura colisionen con algún objeto.

Cuando el usuario se acerque al marco y coloque la pieza dentro de las guías se detectará la colisión. Si la pieza y la zona guía poseen la misma etiqueta se aumenta el contador de aciertos, se elimina la figura, se muestra nuevamente la mano y el usuario escucha una realimentación auditiva, pero si por el contrario, la pieza está en el lugar incorrecto, la figura se mantiene en escena.

El desarrollo de cada uno de los niveles de este ejercicio se enfocó en ir aumentando el número de piezas y una variación en el tamaño para que el usuario realice un mayor movimiento de la articulación y ejercite la motricidad fina. En la Figura 2.41 se muestra una vista de la ejecución de ejercicio.

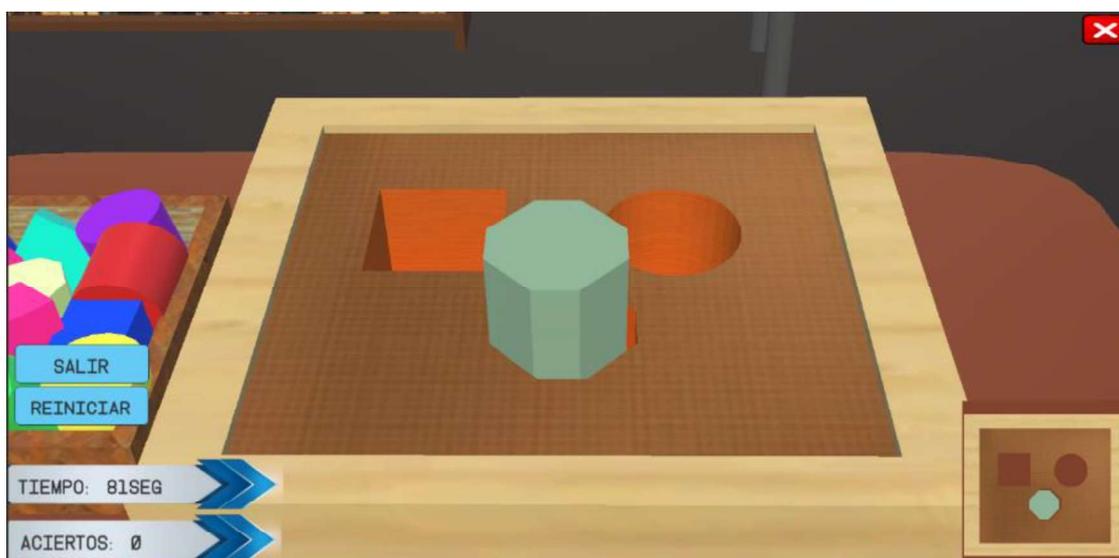


Figura 2.41 Ejecución del ejercicio en el Nivel 1

Funcionamiento del Nivel 3

El funcionamiento general de los niveles 3 se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 2.45. En este ejercicio, las figuras tienen forma de dona y ya no se depositan en el marco con las guías, sino en un palillo del mismo color. El diagrama de flujo muestra un inicio similar al de los niveles anteriores.

La ejecución del ejercicio dura dos minutos. Durante este periodo el usuario podrá moverse a través del área de trabajo mediante una mano asociada a la posición del dispositivo. Si el usuario desea coger una dona debe acercarse a las figuras dispersas en la mesa.

Cuando se detecta una colisión, la esfera se recubre con la forma de la dona, se configura un peso de valor aleatorio, el usuario es capaz de moverla por el espacio de trabajo y sentir la fuerza cuando los bordes de la figura colisionan con algún objeto.

En la escena se tiene una zona límite cuando se presiona el botón. Si lo hace bajo la zona límite se muestra un texto de advertencia, caso contrario, se deja caer la dona. Si la dona no entra dentro de un palillo se elimina y se puede volver a coger una figura. Pero si la dona entró se verifica que las zonas de detección que recubren el cilindro tienen la misma etiqueta que la dona. Si es correcto se aumenta el contador de aciertos y se muestra una dona de un color traslúcido. En caso de que no coincida la etiqueta se elimina la dona.

En todos los niveles durante el transcurso del ejercicio se podrá visualizar, en el lado izquierdo, el tiempo, el número de aciertos y el texto de advertencia. Se tiene dos cámaras: la cámara principal es estática y se encuentra en modo subjetivo; es decir, presenta una perspectiva desde el usuario; la otra cámara está en la esquina inferior izquierda y tiene una vista panorámica de la escena desde la parte superior.

Al transcurrir los dos minutos se muestra un panel que contiene el mensaje de finalización del ejercicio. Además, aparece el número de aciertos, los botones para regresar al menú o continuar el siguiente nivel (este botón es visible en todos los niveles, excepto en el último). En la Figura 2.42 se puede observar una vista del panel final.



Figura 2.42 Panel Final del Ejercicio Consultorios

Este ejercicio fue uno de los más elaborados debido a la gran carga computacional que presentaba instanciar objetos con formas complejas, ya que no solo se debían visualizar

sino también debían contener mallas para que el mundo háptico los maneje adecuadamente. Debido a esto se decidió utilizar objetos con geométricas básicas como lo son los prismas triangulares, octagonales, cuadrados, etc.

Una vez definidas esas figuras se presentó el reto de manejar el sistema háptico como un objeto diferente a una esfera en el mundo háptico de Unity. Para esto se trató de modificar el servidor utilizado con el fin de enviar propiedades extra en la trama de comunicación como el tamaño, vértices, etc. Sin embargo, después de realizar varias pruebas se optó por una solución más sencilla que fue recubrir la esfera asociada al dispositivo háptico (visualizada en estos niveles como una mano) con estas figuras de forma que la esfera en realidad choca con la figura que la recubre y esta, a su vez, colisiona con la interfaz gráfica del nivel, como se muestra en la Figura 2.43.

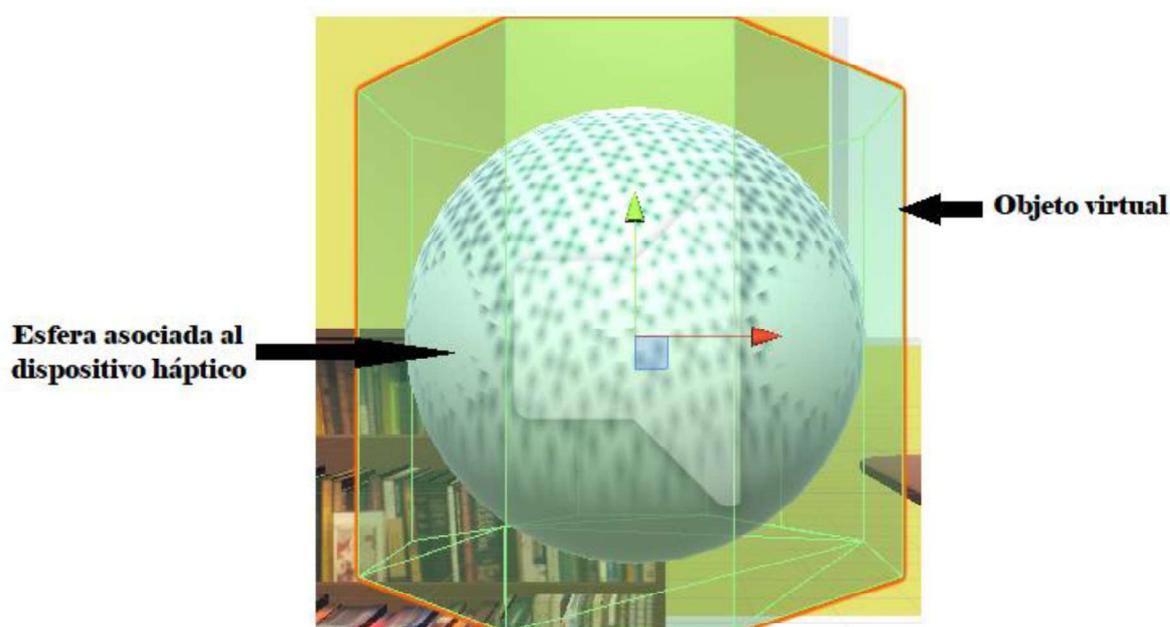


Figura 2.43 Manejo de objetos en el ejercicio Consultorios

Esta solución presenta ciertas limitaciones debido a que al momento de instanciar una figura (con mayor frecuencia las donas del tercer nivel) la instanciación no se realiza con la suficiente rapidez y la figura se crea fuera de la esfera. En los niveles 1 y 2, esto se soluciona de forma automática cuando el sistema detecta que la figura se aleja de la mesa y, en el nivel 3, si esto sucede solo se debe presionar el botón del dispositivo háptico y la esfera se reiniciará para poder coger un nuevo objeto.

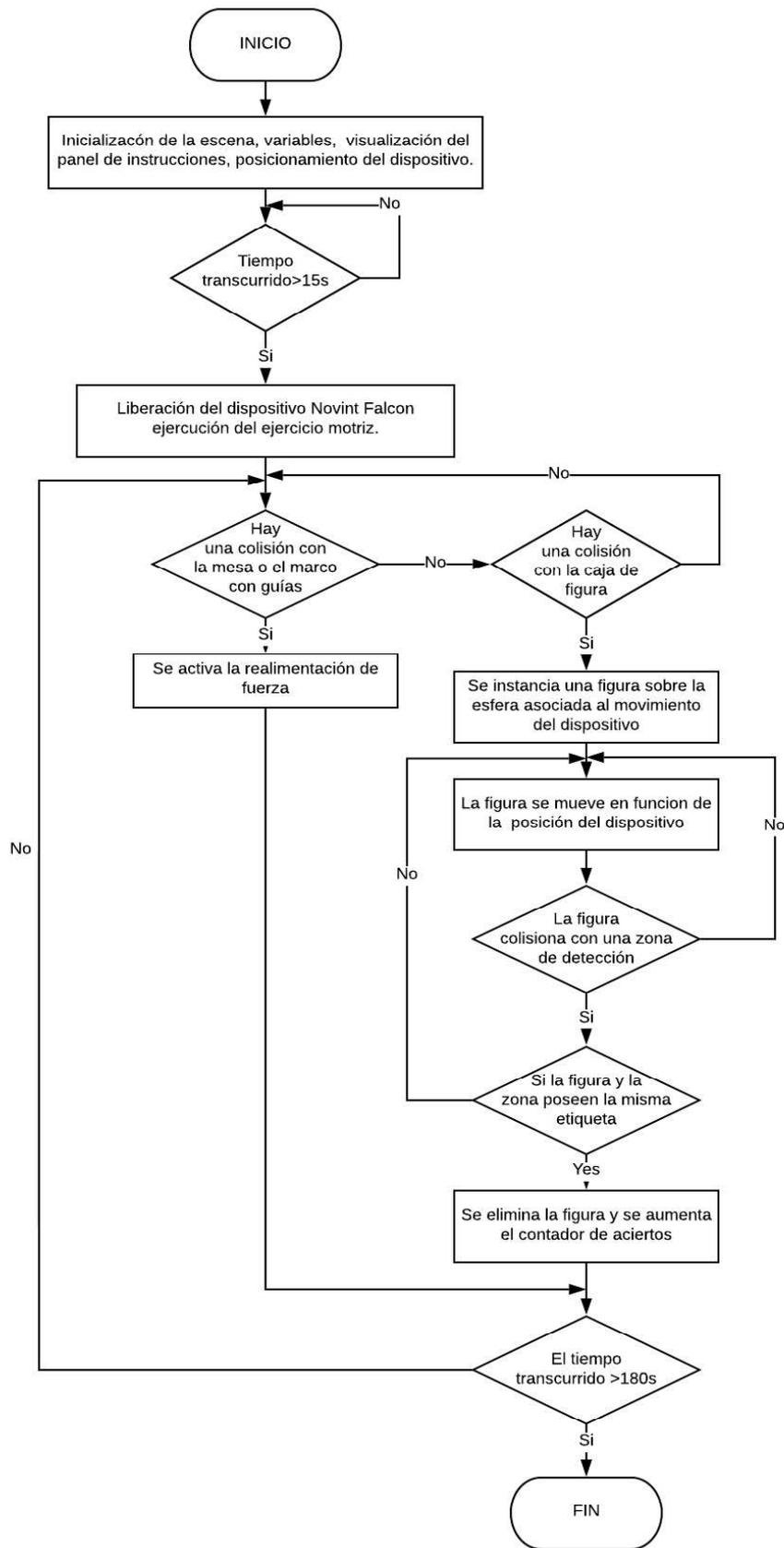


Figura 2.44 Diagrama de Flujo de los Niveles 1 y 2

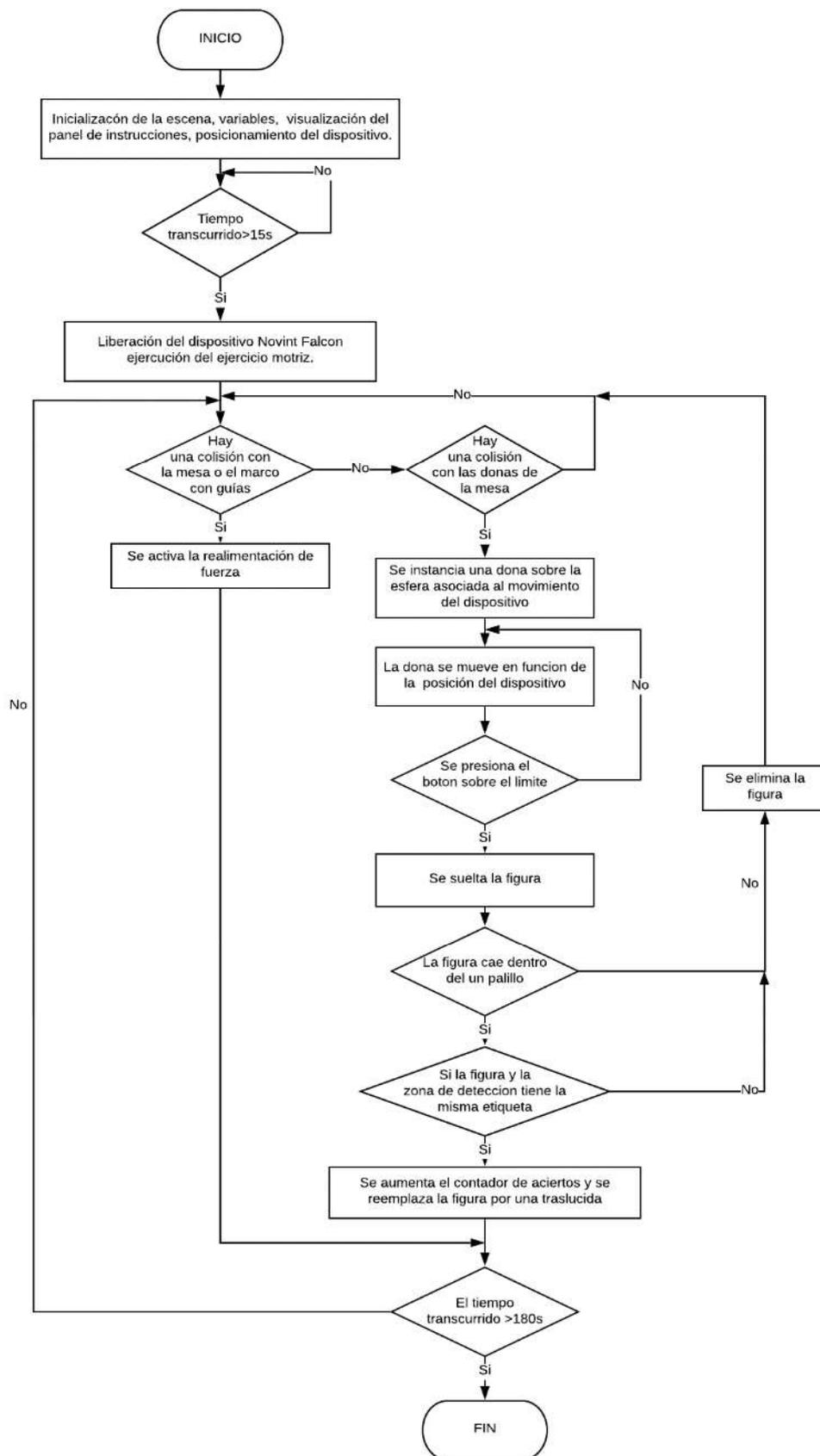


Figura 2.45 Diagrama de Flujo del Nivel 3

2.2.5 DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS

Una vez definidos los ejercicios motrices y sus dinámicas se crea la base de datos para almacenar la información de los pacientes y de cada sesión. La base de datos esta creada en SQLite y es manejada desde scripts realizados en Visual Studio, los cuales se ejecutan a través de botones creados en los Canvas de las escenas en Unity 3D. De esta manera, se incorpora todo el sistema en la misma aplicación permitiendo escribir, modificar o consultar la base de datos desde la propia interfaz de Unity, así los especialistas pueden acceder a los datos de los pacientes de una forma más sencilla que en el software DB Browser, como una aplicación externa.

Para la creación y manejo de la base de datos se decidió dividirla en varias tablas de dos tipos. El primero contiene toda la información de los pacientes que se registran para las rehabilitaciones y tiene el nombre de "Información". Entre los datos que se registran están: nombre del paciente, cédula, edad, patología que será tratada, fecha y hora de registro, como se puede ver en la Figura 2.46.

Nombres	cedula	edad	patologia	Fecha	Hora
Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
Jennifer Guayta	1751277466	23	Tunel Carpiano	04/06/2019	17:28:42
Edgar Ceron	1001592813	53	Fractura	04/06/2019	18:03:10
Elizabeth Agui...	1710098664	51	Neuralgia	04/06/2019	18:18:50
Elena Romero	1801690452	57	Tendinitis de ...	05/06/2019	18:26:20
Paola Carranza	1724404205	23	Tendinitis de ...	07/06/2019	17:24:07
Blanca Carranza	1711390961	49	Neuralgia	07/06/2019	17:36:35
Vianey Enríquez	1718658634	19	Tunel Carpiano	07/06/2019	18:13:33
Cristhian Cobos	1719259762	23	Tunel Carpiano	09/07/2019	16:52:40

Figura 2.46 Ejemplo de la tabla de registro de los pacientes

El segundo tipo se crea automáticamente cuando un paciente se registra; es decir, existe una tabla por cada persona registrada en el sistema y su nombre corresponde a "CI_Número de cedula". Estas tablas contienen toda la información de las sesiones de rehabilitación de cada paciente Entre los datos que se registran están: nombre del paciente; cédula; registro de inicio y fin de la sesión (fecha y hora); ejercicio motriz; nivel; tiempo; errores o aciertos; peso utilizado y hora de realización de cada ejercicio, como se puede ver en la Figura 2.47.

id	Nombres	cedula	Ejercicio	Nivel	Tiempo	errores	Peso	Fecha	Hora
Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
1	Edgar Ceron	1001592813	INICIO	0	0.0	0.0	-	04/06/2019	18:03:27
2	Edgar Ceron	1001592813	Laberinto	1	142.56	10.0	-	04/06/2019	18:06:48
3	Edgar Ceron	1001592813	PUZZLES	1	257.23	2.0	0	04/06/2019	18:11:56
4	Edgar Ceron	1001592813	CONSULTORIO	1	120.0	7.0	-	04/06/2019	18:15:01
5	Edgar Ceron	1001592813	TALADRO	1	67.7	0.0	0	04/06/2019	18:16:39
6	Edgar Ceron	1001592813	FINAL	0	0.0	0.0	-	04/06/2019	18:16:54

Figura 2.47 Ejemplo de las tablas de registro de sesiones de rehabilitación

Como se mencionó anteriormente, las tablas se crearon en DB Browser, ya que este software permite generar y declarar los campos fácilmente; por tanto, este software se utilizó específicamente para la creación del primer tipo de tabla, para almacenar la información de los pacientes y el resto del manejo de datos se lo comanda directamente desde los scripts ejecutados, a través de Unity.

2.2.5.1 DB Browser (SQLite)

Para el registro de los pacientes y la creación de los históricos de cada sesión se requiere utilizar una base de datos que permita almacenar, de forma ordenada, toda esta información. En este sentido, existen varios motores de bases de datos en el mercado, algunos gratuitos y otros de pago. Para la realización de este sistema se utilizó el motor gratuito SQLite.

SQLite es un motor de los más conocidos y utilizados, permite la creación de bases de datos para el almacenamiento de información con software libre y su manejo se da a partir del lenguaje SQL [39]. Sus características se acoplan a las necesidades de este sistema, en la Tabla 2.1, se encuentran sus principales ventajas y desventajas, frente a otros motores de bases de datos.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de SQLite [40].

Ventajas	Desventajas
Es un motor construido en lenguaje C, por lo que es compatible con distintas plataformas	Difícil de programar por medio de comandos de terminal
Las bases de datos en SQLite se almacenan en un solo archivo facilitando su traspaso	Es mono usuario solo un programa a la vez puede modificar o consultar la base de datos
Es una base de datos muy liviana	Está orientada a aplicaciones con poco tráfico
Operaciones de lecturas y escritura rápidas	El tamaño de la base de datos suele tener un máximo de 2Gb
Posibilidades de errores mínimas	Utilizada para bases de datos locales

Una vez seleccionado el motor SQLite para la base de datos se eligió un software libre que permita realizar la creación, modificación y manejo de la base. El software escogido fue DB Browser for SQLite. Este software libre y gratuito permite administrar y crear bases de datos con SQLite, evitando la utilización de grandes cantidades de comandos en lenguaje SQL, posee una interfaz muy sencilla de utilizar basada en tablas que permiten visualizar de forma clara la base de datos creada [41]. Entre sus principales características destacan:

- Permite crear, modificar o eliminar distintas tablas en la base de datos.
- Permite crear, modificar o eliminar distintos índices en cada tabla.
- Maneja varios tipos de datos (int, float, text, etc.)
- Permite visualizar bases guardadas en formato CSV de Excel.

Se seleccionó DB Browser for SQLite debido a la sencillez de su interfaz, la cual permite la creación y modificación de distintas tablas e índices de una forma fácil y sencilla.

2.2.6 INTERFAZ DE USUARIO

Una vez desarrollados los distintos niveles de cada ejercicio se precisó unirlos en una misma interfaz. Esta unificación implicó que tanto el software como el hardware funcionen en conjunto de forma adecuada. Para lo cual se establece el manejo de la comunicación del dispositivo háptico al momento de cambiar de escenas.

Las problemáticas iniciales fueron la desconexión del dispositivo háptico y el desfase del punto de origen (0,0,0) en las coordenadas X, Y y Z en un cambio de escenas. Por tal motivo, se optó por manejar una comunicación intermitente con el dispositivo háptico; es decir, cada escena que requiera el manejo de este dispositivo realiza una conexión a su apertura y una desconexión a su finalización. Por esta razón, cuando se utiliza la aplicación se puede ver que el dispositivo se desconecta y conecta del servidor cada vez que se realiza un cambio de escena. Esto también ayudó a posicionar de mejor manera el dispositivo háptico al empezar un nivel.

Para la elaboración de la interfaz de usuario se dividió la aplicación en varias escenas, con el fin de que cada una de estas muestre diferente información al paciente. La primera escena que el usuario ve al ingresar al sistema se denomina LOGIN, Figura 2.48. En esta escena, el paciente debe registrar su cédula para poder ingresar a la rehabilitación. Cuando no está registrado en el sistema se desplegará un botón que enviará al paciente a una escena de registro. Si ya consta en el registro se desplegará un mensaje de bienvenida

con sus datos y, además, aparecen dos botones: uno de ingreso a la sesión (al presionarlo el paciente verá la escena de menú principal) y otro de borrar paciente (elimina del sistema el registro de una persona).



Figura 2.48 Escena de LOGIN Escena de LOGIN

Si el fisioterapeuta requiere hacer una consulta de los históricos de algún paciente, la escena de LOGIN tiene un botón (VER PACIENTES) que conduce a una escena de consulta, Figura 2.49. En esta escena existe un menú deslizable para escoger el nombre del paciente que se quiere consultar y, al hacerlo, se despliega en la parte superior la información correspondiente a sus datos personales y, en la parte inferior, se muestra un cuadro de texto con Scroll que permite ver todas las sesiones que ha tenido el paciente junto con la información sobre el rendimiento de cada ejercicio.

SELECCIONE NOMBRE: Edgar Ceron					
PACIENTE: EDGAR CERON		CÉDULA: 1001592813		EDAD: 53	
PATOLOGÍA: FRACTURA		FECHA REGISTRO: 04/06/2019		HORA REGISTRO: 18:03:10	
EJERCICIO	NIVEL	TIEMPO (SEG.)	ERRORES/ ACIERTOS	PESO	FECHA HORA
FINAL DE LA SESION					18/06/2019 18:17:46
INICIO DE LA SESION					19/06/2019 18:01:49
TALADRO	2	77.38	0 E	4	18:03:52
TALADRO	1	51.12	0 E	4	18:04:58
LABERINTO	1	31.34	1 E	-	18:06:10
LABERINTO	2	53.77	3 E	-	18:07:16
PUZZLES	1	55.05	0 E	4	18:08:34
PUZZLES	2	82.95	1 E	4	18:10:12
CONSULTORIO	1	120	22 A	-	18:12:34
FINAL DE LA SESION					19/06/2019 18:15:24
INICIO DE LA SESION					20/06/2019 17:54:32

Figura 2.49 Escena de consulta de datos de pacientes

En la escena de Registro, el fisioterapeuta debe ingresar los datos del paciente por primera vez, como se explicó en el apartado de base de datos. Esta información se guardará en el primer tipo de tabla. Como entrada de texto se encuentran los datos de nombre, cédula y edad; mientras que las opciones de patologías disponibles para este proyecto (Fractura, Túnel Carpiano, Tendinitis de Quervain y Neuralgia) se despliegan en modo de un menú deslizable.

REGISTRO DE NUEVOS PACIENTES

NOMBRE:

CÉDULA:

EDAD:

PATOLOGÍA

- ✓ Fractura
- Tunel Carpiano
- Tendinitis de Quervain
- Neuralgia

Figura 2.50 Escena de Registro de pacientes

En el caso de que el paciente si esté registrado y quiera iniciar la rehabilitación, en el momento de dar clic en el botón de comenzar terapia del LOGIN, se desplegará una escena de menú principal, Figura 2.51 Menú principal de la aplicación , la cual consta de 4 grandes botones con animaciones correspondientes a cada uno de los 4 ejercicios motrices desarrollados.

En la parte derecha inferior se encuentra un mensaje de advertencia: No tocar el dispositivo háptico, ya que desde esta escena en adelante se posicionará repetidamente como se requiera. En la parte superior derecha se tienen dos botones, uno de sesiones anteriores que despliega una escena muy similar a la de la Figura 2.49 y el otro botón con la inscripción terminar sesión, el cual finaliza la rehabilitación y devuelve a la escena LOGIN.



Figura 2.51 Menú principal de la aplicación

Cuando el paciente da clic en cualquiera de los 4 botones principales de los ejercicios motrices, la aplicación lo redirecciona a un submenú correspondiente al ejercicio que haya elegido como se muestra en la

Figura 2.52. Existen 4 submenús, uno por cada ejercicio motriz. Cada uno tiene 3 botones principales que redirigen al paciente a los niveles detallados anteriormente en el apartado de desarrollo de los ejercicios motrices. Además, posee un botón de regreso al menú principal y un mensaje de advertencia: No tocar el dispositivo háptico mientras se posiciona.



Figura 2.52 Submenú de cada ejercicio motriz

Todas las sub pantallas de la aplicación, excepto por el LOGIN, poseen en su esquina superior derecha un botón con una X, la finalidad de este botón es finalizar la aplicación en cualquier momento asegurándose de que todos los datos de la sesión se guarden correctamente.

Una vez finalizado el diseño de la interfaz de usuario, se utilizó una herramienta de Unity3D para crear una aplicación ejecutable que se acopla a la resolución de la pantalla donde se ejecute. En la creación de esta aplicación se usaron tres distintos niveles de calidad de imagen, esta calidad será escogida de forma automática por la computadora donde se ejecute dependiendo de su capacidad de procesamiento. Al ejecutar esta aplicación se presenta un menú de apertura que permite elegir al usuario la resolución que desea manejar y si desea que se ejecute la aplicación en pantalla completa o como ventana. Una vez iniciada la aplicación esta abrirá automáticamente la aplicación de comunicación Falcon Server.

Al momento de construir la aplicación se crea una carpeta con los archivos que esta necesita para funcionar correctamente, sin embargo, es necesario añadir de forma manual dentro de la subcarpeta "plugin" los archivos de la base de datos y la aplicación de comunicación Falcon Server. Además esta aplicación es compatible con 32 y 64 bits y una vez generada tiene un logotipo con el dispositivo háptico Novint Falcon y tiene el nombre de "REHABILITATION WRIST".

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 HARDWARE

3.1.1 VALIDACIÓN DEL EJE DE PRENSIÓN FINA

El diseño del eje de presión fina fue evaluado y validado por un fisioterapeuta mediante pruebas de movilidad. El diseño final cuenta con 4 piezas (Figura 2.3) que poseen un acoplamiento con la mitad del efector del dispositivo Novint Falcon. Debido a los requerimientos de la Interfaz de Usuario en el eje se colocó un botón que se acopla con la placa de botones del dispositivo.

Los planos de la versión final se adjuntan en el ANEXO B. Los dos casquetes se imprimieron con el material resina, las partes de un eje se imprimieron en el material plástico PLA. Se realizaron pruebas con el software del dispositivo Novint Falcon (Figura 3.1) para validar que el botón en el eje de presión fina funcione correctamente en el software se comprueba que se encienda la luz correspondiente al botón 2 como se ve en la Figura 3.2.

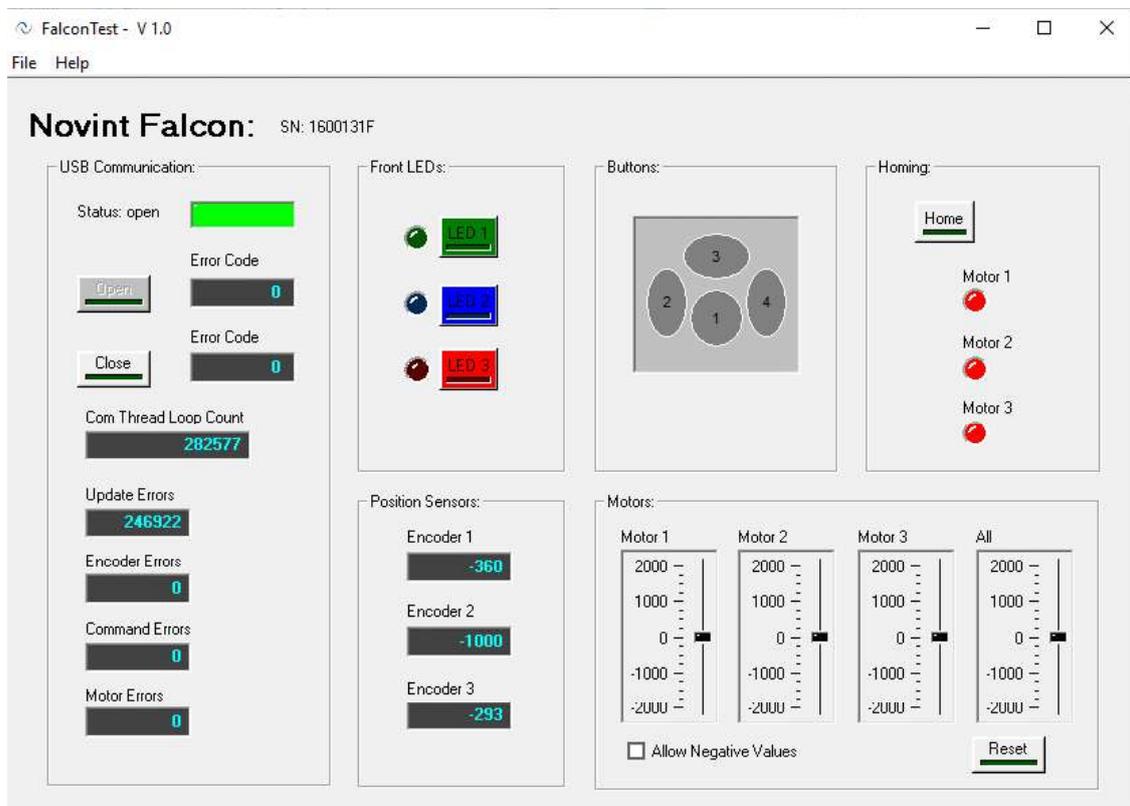


Figura 3.1 Software de pruebas Falcon Test

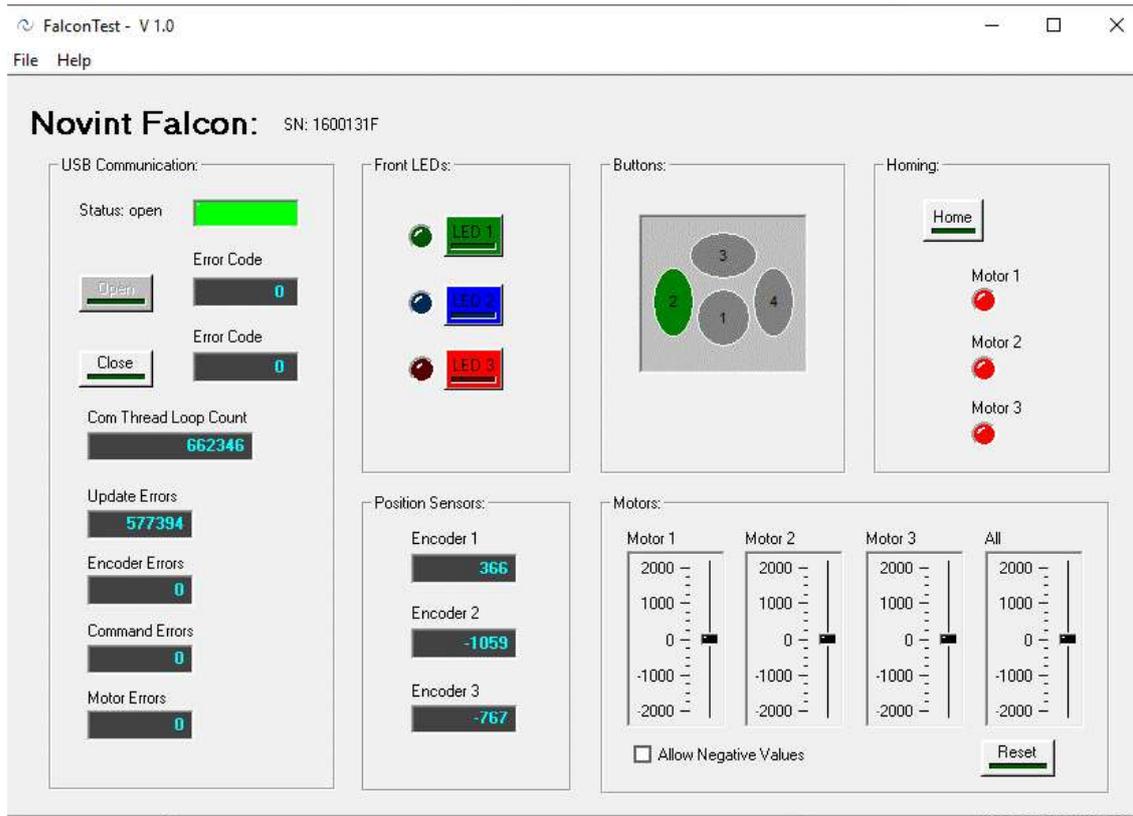


Figura 3.2 Prueba del botón en el Software Falcon Test

Se realizaron 10 pruebas y estas demostraron que el botón colocado en el eje de presión fina funciona correctamente, solo puede haber errores cuando el usuario realice una presión excesiva y el botón se quede trabado.

3.1.2 VALIDACIÓN DEL SOPORTE DEL ANTEBRAZO

El diseño del soporte del antebrazo sufrió modificaciones tanto en sus dimensiones como en su forma. La versión final fue evaluada y validada por un fisioterapeuta, su plano se lo puede ver en el ANEXO C. La pieza fue impresa con el material plástico PLA. Para asegurar el soporte a la superficie de la mesa se usan un sistema de engranajes también impresos con plástico PLA, dichos engranajes se descargaron de manera gratuita y mostraron ser funcionales y seguros.

3.2 COMUNICACIÓN

3.2.1 VALIDACIÓN DE LA APLICACIÓN FALCON SERVER Y LA LIBRERÍA DINÁMICA

En la construcción de la aplicación Falcon Server y la librería dinámica pueden existir fallos al no configurar bien los parámetros de construcción del proyecto. Para comprobar la funcionalidad se aplica una prueba a la aplicación. En esta prueba se conecta el dispositivo

háptico a la computadora, abrir la aplicación Falcon Sever y ejecutar el proyecto Falcon ServerTest. La función de este código es enviar un paquete de datos a la aplicación.

Puede haber diferentes fallos como, por ejemplo, al abrir la aplicación de prueba esta se cierre intempestivamente, lo que significaría un error en las configuraciones de la construcción.

En la Figura 3.3 se ve la consola de la aplicación de prueba del Falcon Server. Cuando no hay error de comunicación se imprimen los comandos enviados y la confirmación de que ha sido recibida. Posteriormente, se muestra el número de frames y los valores posición y de fuerza. Se realizó el procedimiento por 20 veces de las cuales solo se presentaron 2 fallas.

```
Select C:\falcommunity\FalconServerTest\bin\Debug\FalconServerTest.exe
Socket connected to 127.0.0.1:8747
Sent START, received TRUE
1
Sent GOD object, received TRUE
Sent dynamic object, received TRUE
Apply Force to object, received TRUE
Apply Force to GOD, received TRUE
Set God to Rigid Body, received TRUE
FPS: 990.115 Tip: (0.0105098, -0.0421883, 0.0211882) God (0, -0.0416239, 0) Forces (-0.630588, 0.0342231, -1.27129)
FPS: 1015.72 Tip: (0.0105098, 0.957812, 0.0211882) God (0, 0.958322, 0) Forces (-0.630588, 0.0309262, -1.27129)
FPS: 1010.71 Tip: (0.0105227, 0.957764, 0.0211811) God (0, 0.958277, 0) Forces (-0.631362, 0.0310421, -1.27087)
FPS: 994.49 Tip: (0.0104966, 0.957727, 0.0211627) God (0, 0.958232, 0) Forces (-0.629798, 0.0305772, -1.26977)
FPS: 1003.45 Tip: (0.0104966, 0.957727, 0.0211627) God (0, 0.958194, 0) Forces (-0.629798, 0.0283027, -1.26977)
FPS: 1002.67 Tip: (0.0104966, 0.957727, 0.0211627) God (0, 0.958156, 0) Forces (-0.629798, 0.0260124, -1.26977)
FPS: 1001.46 Tip: (0.0104966, 0.957727, 0.0211627) God (0, 0.958121, 0) Forces (-0.629798, 0.0238581, -1.26977)
FPS: 978.474 Tip: (0.0105095, 0.95768, 0.0211556) God (0, 0.958087, 0) Forces (-0.630573, 0.0246713, -1.26934)
FPS: 992.733 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.958055, 0) Forces (-0.629009, 0.0249839, -1.26823)
FPS: 1004.84 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.958024, 0) Forces (-0.629009, 0.0231314, -1.26823)
FPS: 1019.01 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.957995, 0) Forces (-0.629009, 0.0213525, -1.26823)
FPS: 996.016 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.957965, 0) Forces (-0.629009, 0.0195694, -1.26823)
FPS: 997.825 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.957941, 0) Forces (-0.629009, 0.0180659, -1.26823)
FPS: 1007.11 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.957916, 0) Forces (-0.629009, 0.0165653, -1.26823)
FPS: 1003.27 Tip: (0.0104835, 0.957642, 0.0211372) God (0, 0.957892, 0) Forces (-0.629009, 0.0151598, -1.26823)
FPS: 1001.18 Tip: (0.0104574, 0.957605, 0.0211188) God (0, 0.957869, 0) Forces (-0.627446, 0.0160039, -1.26713)
```

Figura 3.3 Consola del proyecto Falcon Sever Test

3.2.2 VALIDACIÓN DE LA COMUNICACIÓN DEL SISTEMA

La comunicación del sistema cuenta con: la librería dinámica, la aplicación Falcon Server y el script de comunicación en la interfaz de usuario. Cada vez que se abre la interfaz de usuario debe abrirse la aplicación Falcon Server. Una comprobación que la comunicación entre el dispositivo háptico y la interfaz de usuario es el logo del dispositivo.

Si el logo se muestra de diversos colores como en la Figura 3.4b implica que no hay comunicación. Si, por el contrario, el logo se muestra de color rojo Figura 3.4a se está abriendo la comunicación. Para activar si debe presionar la pinza en forma horizontal hasta que el logo cambie a un color azul, como se muestra en la Figura 3.4c el dispositivo se encuentra comunicado con la interfaz.



Figura 3.4 Logo del dispositivo

En la consola de la aplicación se imprimen: conexión, puerto, inicialización de servos, el mensaje de apertura del mundo físico seguido del número de dispositivos hápticos. En caso de que la comunicación funcione de manera adecuada como se observa en la Figura 3.5. Si la interfaz no se comunica con la aplicación, en un periodo de 10 segundos, se cierra la comunicación y se imprime el mensaje de “Timeout waiting for client, assuming it is dead”. Por el contrario, la consola empieza a imprimir arrays de números, esto indica una falla en el paquete de datos recibidos. Esto se debe a un problema en la interfaz de usuario.

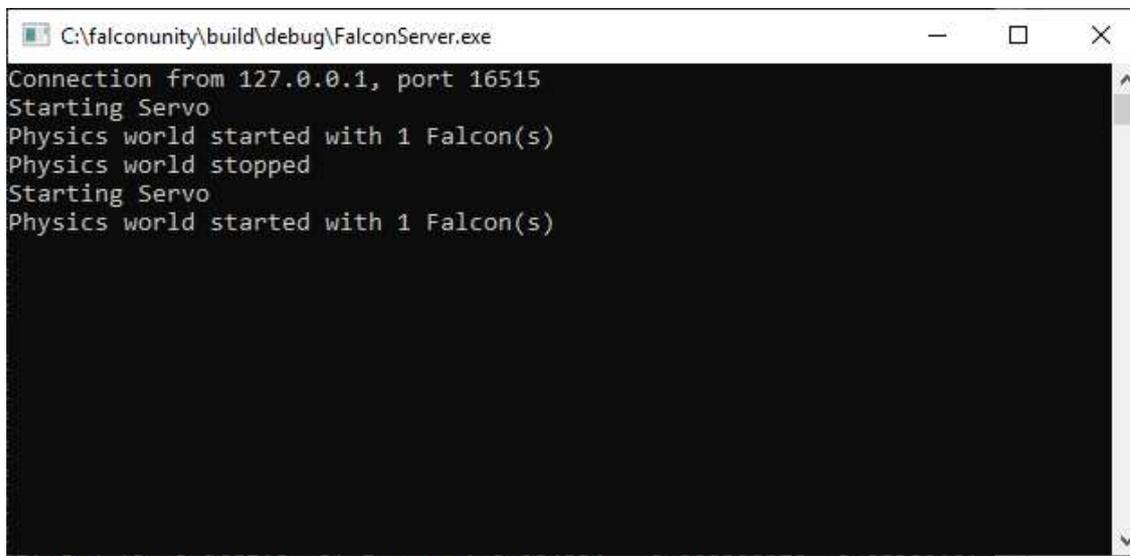


Figura 3.5 Consola del Falcon Server

Para la validación de la comunicación del sistema se realizaron 30 pruebas de comunicación con dos distintas computadoras, se comprobó la comunicación por medio de la consola del Falcon Server y se realizaron uno o dos ejercicios de mayor carga computacional. En la Tabla 3.1 se muestra los resultados conseguidos como: parámetros se tiene la detección del dispositivo, la activación mediante el movimiento del eje de

preensión, la apertura de la comunicación y, por último, se valoró el funcionamiento de los ejercicios probados en una escala del 1 al 10.

Tabla 3.1 Tabla de Pruebas de Comunicaciones

No. Prueba	USB	Detección	Activación	Conexión	Funcionamiento
1	3.0	✓	✓	✓	10
2	3.0	✓	✓	✓	9
3	3.0	✓	✓	✓	10
4	3.0	✓	✓	✓	10
5	3.0	✓	✓	✓	10
6	3.0	✓	✓	✓	10
7	3.0	✓	✓	✓	10
8	3.0	✓	✓	✓	10
9	3.0	✓	✓	✗	0
10	3.0	✓	✓	✓	6
11	3.0	✓	✓	✓	6
12	3.0	✓	✓	✓	6
13	3.0	✓	✓	✓	7
14	3.0	✗	✗	✗	0
15	3.0	✓	✓	✓	10
16	2.0	✓	✓	✓	9
17	2.0	✓	✓	✓	10
18	2.0	✓	✓	✓	10
19	2.0	✓	✓	✓	10
20	2.0	✓	✓	✓	10
21	2.0	✓	✓	✓	10
22	2.0	✗	✗	✗	0
23	2.0	✓	✓	✓	10
24	2.0	✓	✓	✓	10
25	2.0	✓	✓	✓	10
26	2.0	✓	✓	✗	0
27	2.0	✓	✓	✓	10
28	2.0	✓	✓	✓	10
29	2.0	✓	✓	✓	9
30	2.0	✓	✓	✓	10

En las pruebas se obtuvo que la detección y activación del dispositivo se realizó de manera correcta el 93% de las veces; mientras que la apertura de la comunicación se efectuó de manera correcta un 86%. Los errores de comunicación observados se pueden deber a

diferentes motivos, uno de ellos es el puerto USB usado, si es un puerto de carga o está en malas condiciones puede fallar la comunicación.

Otra de las causas de fallas en la comunicación es ocasionada por el antivirus, debido a que la aplicación Falcon Server puede ser considerado por el antivirus como una amenaza y ser eliminado de la carpeta. Por ello, se recomienda que antes de ejecutar por primera vez la interfaz de usuario esta sea excluida en el antivirus usado o desactivar el antivirus durante la ejecución.

3.3 SOFTWARE

3.3.1 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LA MALLA

Como se explicó en el desarrollo de este proyecto, todo objeto que deba seguir leyes físicas (entre las cuales se encuentran las colisiones) debe tener una malla que lo recubra. Esta malla es configurable en Unity3D, a través de varios factores, el más importante es el ancho de piel que determina el tamaño y la geometría que conforma el mallado que envuelve el objeto.

Mientras más pequeño sea este ancho de piel, el mallado se ajustará de mejor manera a la pieza; sin embargo, mientras más pequeño es este ancho la computadora requiere de más recursos para el procesamiento. Por lo tanto, en objetos que poseen geometrías básicas como las piezas de rompecabezas o los laberintos, entre otros se utilizó un mallado de ancho de piel muy pequeño (0.001), ya que esto no retarda la ejecución de la aplicación.

Por otro lado, en objetos de geometrías más elaborados como lo son los toroides utilizados como donas en el tercer nivel de consultorios, al utilizar un ancho de piel tan pequeño se producían retardos en la aplicación cuando estos entraban en colisiones o cuando aparecían en escena, por lo que se utilizó un ancho de piel mucho más grande (0.3) que, en efectos prácticos, mejora el rendimiento de la ejecución del programa sin sacrificar demasiada exactitud al detectar las colisiones.

Debido a lo expuesto anteriormente, en toda la aplicación existen varios objetos que requieren de esta malla para su correcta interacción. Cada uno de estos objetos poseen valores de ancho de piel diferentes, calibrados para que la ejecución del programa no se vea afectada de forma significativa sin perder mucha exactitud en la detección de colisiones. En la Figura 3.6 se pueden observar diferentes mallas utilizadas por los objetos virtuales de este proyecto.

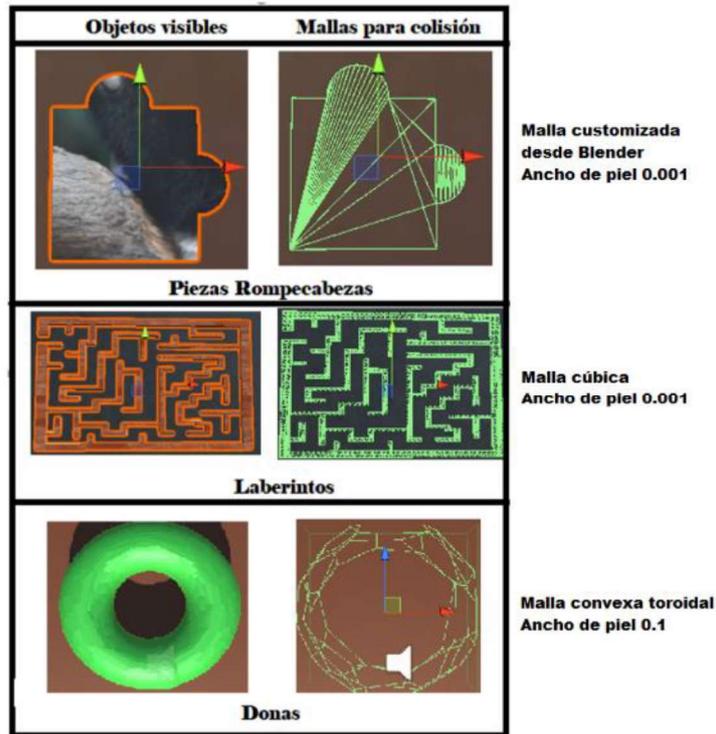


Figura 3.6 Mallados de los objetos para detección de colisiones

3.3.2 PRUEBAS DE LA BASE DE DATOS

La creación y manejo de la base de datos presentó varios retos durante el desarrollo del proyecto. Primero, fue necesario pensar el esquema general de la base de datos, para lo cual se creó dos tipos de tablas: el primero encargado de almacenar la información general de todos los pacientes y, el segundo, destinado para almacenar todas las sesiones realizadas por cada uno.

Una vez definidas estas tablas, con ayuda de los fisioterapeutas, se creó los distintos índices que contendrían cada una con la información necesaria para el seguimiento de la terapia. Estos índices se encuentran representados en la Figura 3.7 con la finalidad de poder almacenar datos extra que permitan visualizar de mejor manera el desenvolvimiento de los pacientes en ciertos ejercicios, al segundo tipo de tabla se añadió un índice de trayectoria, cuya función se explicará más adelante.

Tabla de información de todos los pacientes

Table:

id	Nombres	cedula	edad	patologia	Fecha	Hora
----	---------	--------	------	-----------	-------	------

Tabla de históricos de rehabilitación

Table:

id	Nombres	cedula	Ejercicio	Nivel	Tiempo	errores	Peso	Fecha	Hora	Trayectoria
----	---------	--------	-----------	-------	--------	---------	------	-------	------	-------------

Figura 3.7 Estructuras de las tablas de la base de datos

Luego de establecer cómo se manejará la base de datos, se realizaron las pruebas de escritura, lectura y creación de tablas. Para esto se desarrollaron diversos Scripts base en el compilador Visual Studio, todos estos utilizaron lenguaje SQL para acceder a la base de datos con comandos simples como: CREATE TABLE IF NOT EXIST, INSERT INTO, DELETE FROM _____ WHERE, SELECT FROM _____ WHERE, etc.

Una vez creados, se introdujeron en distintos botones de la interfaz de usuario de Unity, desde los cuales se comandaba su ejecución. De esta manera se encontró y corrigió diversos errores asociados al manejo de datos, además se comprobó y afinó la comunicación entre Unity y la base de datos externa.

```

string conn = "URI=file:" + Application.dataPath + "/Plugins/BASEDATOS.db"; //Path to database.
IDbConnection dbconn;
dbconn = (IDbConnection)new SqliteConnection(conn);
dbconn.Open(); //Open connection to the database.
IDbCommand dbcmd = dbconn.CreateCommand();
string sqlQuery = "SELECT * FROM CI_"+info.cedula+""; // para elegir uno en particular (FROM informacion WHERE id = 1)
Debug.Log("Log" + sqlQuery);

dbcmd.CommandText = sqlQuery;
IDataReader reader = dbcmd.ExecuteReader();
respuestaBase2 = "Paciente: "+info.nombre+"\nCédula:"+info.cedula+ " \t\t\t\t\t\t\tErrores\nEjercicio\t Nivel\t Tiempo (seg.)\tAciertos\t Peso\t Fecha\t\t Hora";

while (reader.Read())
{
    string ejercicio = reader.GetString(3);
    int32 nivel= reader.GetInt32(4);
    float tiempo = reader.GetFloat(5);
    float errores = reader.GetFloat(6);
    string pesos = reader.GetString(7);
    string fecha = reader.GetString(8);
    string hora = reader.GetString(9);
}

```

Figura 3.8 Ejemplo de función para lectura de base de datos con comandos SQL

Uno de los errores presentados fue el incorrecto uso de los tipos de datos para guardar de forma adecuada la información, debido a que cada paciente tiene asociado una tabla con toda la información sobre sus terapias, esta posee el nombre: "CI_XXXXXXXXXX" donde X representa los 10 dígitos de su cédula. Este dato se guarda como un número entero (int) que, posteriormente, se añade a una cadena de texto que daba el nombre a la tabla. Un ejemplo de este nombre de tabla se encuentra representado en la Figura 3.7.

Esto no suponía un error siempre y cuando el número de cédula del paciente empezara con un número diferente de 0; sin embargo, en nuestro país son varias las provincias donde sus ciudadanos poseen números de cedulas que comienzan por este número, generando

un error cuando se trataba de acceder a su tabla debido a que esta solo poseía 9 dígitos en su cedula al obviar el 0. Por tal motivo, se requirió rellenar una cadena de texto con ceros a la izquierda para asegurar que existan 10 dígitos en la cédula antes de crear la tabla del paciente. Al igual que este, existieron más errores causados por la forma de guardar los datos, los cuales fueron corregidos de formas similares para garantizar su correcta lectura.

Anteriormente se mencionó un índice de trayectoria, este índice solo fue añadido en los ejercicios Laberintos y Taladros y tuvo como objetivo almacenar el camino que el paciente siguió para superar el nivel, con el fin de realizar una comparación entre el movimiento realizado por el paciente cuando se inició la terapia y el movimiento que logra tener cuando ya ha culminado varias sesiones. Esta adición a la tabla presentaba un gran problema, ya que el índice almacenaba coordenadas X y Y en cada iteración, por lo que si el paciente era excesivamente lento se corría el riesgo de que los datos se desborden. Para corregir este problema se realizó varias pruebas con personas que no habían utilizado el sistema con anterioridad para definir cuál sería el tiempo máximo que le tomaría a un paciente culminar el nivel. Este tiempo fue sobredimensionado para evitar errores y sobre el mismo se calculó el tiempo de muestreo que se utilizó para tomar cada coordenada que almacena la trayectoria.

3.4 PRUEBAS DEL SISTEMA DE REHABILITACIÓN

Con el fin de probar el proyecto desarrollado en un ambiente real, este se montó en el Consultorio Huellas Fisioterapia, donde los fisioterapeutas lo utilizaron con 5 pacientes voluntarios para hacer una rehabilitación activa bajo asistencia técnica. De estos pacientes, 1 tenía una fractura, 2 sufrían neuralgias, 1 Tendinitis de Quervain y el último Túnel carpiano.

Esta rehabilitación se realizó por un periodo de 6 semanas, 3 sesiones por semana con una duración de entre 45 minutos a 1 hora por paciente. Para cada sesión, el fisioterapeuta iniciaba quitando el dolor producido por las distintas patologías (analgesia), mediante el uso de electroterapia combinado con la aplicación de calor o frío; utilización de técnicas manuales o instrumentales acorde a la patología de cada paciente. Esto con el objetivo de relajar la musculatura de la zona afectada, ayudar con procesos inflamatorios y mejorar la movilidad del segmento que presentaba problemas.

Una vez finalizado este proceso inicial los pacientes utilizaban el sistema háptico, partiendo desde el nivel 1 de cada ejercicio. Conforme cada uno iba avanzado en su recuperación y, con la supervisión del especialista, los pacientes realizaron los demás niveles de cada

ejercicio y el fisioterapeuta fue variando la emulación de peso acorde a la mejoría de la afección del paciente.

Cada sesión tuvo la asistencia técnica por eventuales errores que se puedan generar y brindar una adecuada compañía al fisioterapeuta que supervisaba la correcta ejecución de los movimientos. A continuación, se presenta una figura con los resultados de cada uno de estos pacientes, luego de finalizar la terapia.

		MOVIMIENTO ACTIVO				MOVIMIENTO PASIVO				FUERZA MUSCULAR	PRUEBAS				COMENTARIO
		Flexión	Extensión	Desviación Radial	Desviación Cubital	Flexión	Extensión	Desviación Radial	Desviación Cubital		Phalen	Tinnel	Phalen invertido	Quervain	
PACIENTE 1 PATOLOGÍA: NEURALGÍA NERVIO MEDIANO	INICIO	68	76	21	56	80	85	30	61	4/5 muñeca (der) 3/5 extensión 3/5 prensión	+	+			DOLOR
	FINAL	83	83	28	56	86	87	33	61	4/5 flexión 4/5 extensión	-	-			SIN DOLOR
PACIENTE 2 PATOLOGÍA: FRACTURA	INICIO	53	60	15	30	62	71	21	46	4/5 flexión 4/5 extensión	+		+		SIN DOLOR
	FINAL	56	74	32	36	65	82	31	45	4/5 flexión 4/5 extensión	-		-		
PACIENTE 3 PATOLOGÍA: TENDINITIS DE QUERVAIN	INICIO	69	89	28	50	100	91	33	62	4/5 Daniels	+	+	-	+	SIN DOLOR
	FINAL	95	90	49	60	100	100	50	76	4/5 Daniels	-	-	-	-	
PACIENTE 4 PATOLOGÍA: NEURALGÍA NERVIO MEDIANO	INICIO	55	56	24	35	74	85	49	46	3/5 todo rango	+		+		SIN DOLOR
	FINAL	65	57	37	42	74	88	49	45	4/5 Daniels	-		+		
PACIENTE 5 PATOLOGÍA: TUNEL CARIPIANO	INICIO	89	80	28	61	101	100	36	70	4/5 flexion	+	+			DOLOR FLEXIÓN
	FINAL	91	84	42	62	108	106	51	71	4/5 flexión 4/5 extensión	-	-			SIN DOLOR

Figura 3.9 Tabla con los resultados obtenidos después de la terapia

Al iniciar y finalizar todo el proceso de rehabilitación se hicieron varias pruebas en los pacientes para poder contrastar resultados. Tanto al iniciar como al finalizar se midió los grados de movilidad, tanto activa como pasiva, de los pacientes en los 4 movimientos principales de la muñeca. Además, se midió el grado de fuerza dependiendo de las limitaciones producidas por las patologías correspondientes y se realizaron 4 pruebas según se requería.

La primera prueba para determinar si se presenta el signo de Phalen consiste en flexionar el carpo del paciente durante 60 segundos. Si después de este tiempo se presenta un dolor en el territorio del nervio mediano se considera a la prueba positiva. La segunda es para determinar el signo de Tinnel. Esta es positiva si el paciente presenta dolor o hormigueo al realizar una percusión (con martillo) sobre el túnel carpiano. La tercera determina el signo de Phalen invertido, en esta se extiende el carpo junto con los dedos por 60 segundos. Si

se produce dolor en nervio mediano se considera la prueba positiva. La última es una prueba para determinar si el paciente padece de Tendinitis de Quervain, la prueba también es conocida como prueba de Finkelstein. En esta, el paciente debe flexionar el pulgar sobre la palma, hacer puño con la mano y llevar la muñeca hacia el meñique. En caso de que estos movimientos le causen dolor al pulgar, esta prueba se considera positiva.

Como se puede ver en la Figura 3.9 todos los pacientes terminaron la terapia sin presentar dolor en sus movimientos. Además, todos obtuvieron mejorías en los grados de movilidad tanto activa como pasiva respecto a cuando empezaron la terapia.

El paciente número 3 fue el que obtuvo los mejores resultados. Él sufre de Tendinitis de Quervain, por lo que se le realizó las 4 pruebas al iniciar la terapia, de estas dio positivo en Phalen, Tinnel y Quervain que, al finalizar la terapia, dieron negativas. Los rangos de movimiento activo aumentaron principalmente en la flexión y desviación radial de su muñeca y, los rangos de movimiento pasivo, de igual manera aumentaron considerablemente, sobre todo en la desviación radial y cubital. Por lo tanto, la terapia realizada en este paciente durante las 6 semanas presenta una mejoría notable en la movilidad de la zona afectada.

El paciente número 5 obtuvo también resultados notables. Él sufre de Túnel Carpiano y dio positivo en las pruebas de Phalen y Tinnel al iniciar la terapia. Este paciente presentaba un dolor constante al flexionar la muñeca y poseía un rango de movilidad muy limitado al realizar la desviación radial. Una vez que finalizó la rehabilitación se pudo observar que el dolor de la flexión desapareció casi por completo y que el rango de movilidad de la desviación radial aumentó ampliamente, tanto en movimientos activos realizados por el fisioterapeuta como en los movimientos pasivos realizados por el paciente.

3.4.1 ANÁLISIS DE LOS REGISTROS HISTÓRICOS

Con el fin de mostrar una gráfica que permita ver un avance entre la situación inicial y final de los pacientes se realizó un análisis de trayectorias para ciertos ejercicios, a continuación, se presentan distintas figuras que permiten ver el avance en la precisión de los movimientos.

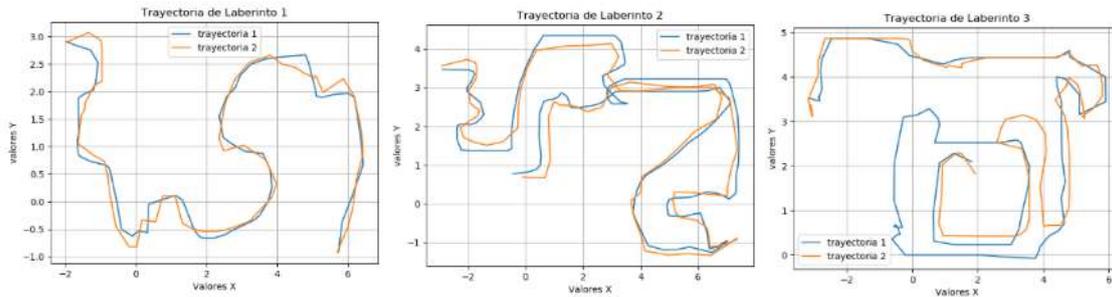


Figura 3.10 Trayectorias del ejercicio Laberintos – Paciente 1

En la figura anterior se observan dos trayectorias para cada uno de los niveles del ejercicio Laberintos. La Trayectoria 1 corresponde a una trayectoria almacenada en las primeras veces que se realizó el ejercicio, mientras que la Trayectoria 2 corresponde a una trayectoria al finalizar la rehabilitación. Se puede observar que por lo general las trayectorias 2 son un poco más suaves en sus movimientos, pero no se logra ver una diferencia notable. Sin embargo, hay que considerar que las trayectorias al finalizar la rehabilitación se realizaron en un tiempo mucho menor que al iniciar, mostrando que existe una mejoría en la precisión del paciente.

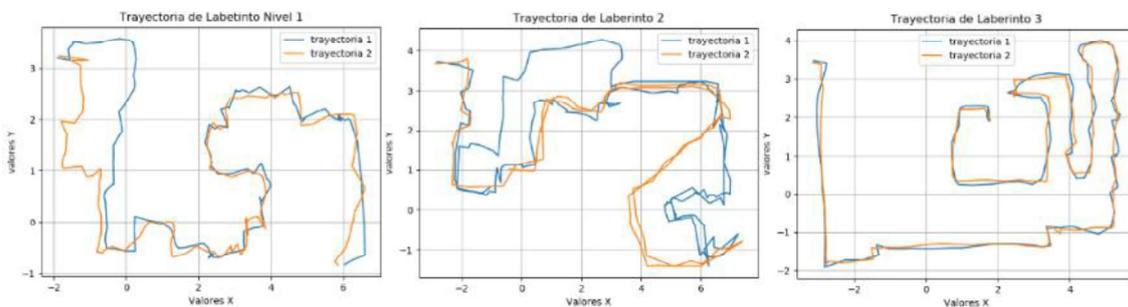


Figura 3.11 Trayectorias del ejercicio Laberintos – Paciente 4

En la Figura 3.11 se ven los resultados del paciente 4. Aquí se observa que las trayectorias 1, tanto del nivel 1 y 2, poseen movimientos muy bruscos y desorganizados; sin embargo, las trayectorias 2 de todos los niveles presentan movimientos más suaves y directos. Además, al finalizar la rehabilitación cada nivel fue resuelto de forma más rápida, mostrando el avance en la precisión del paciente. El análisis de todas las trayectorias se realizó en conjunto con los fisioterapeutas.

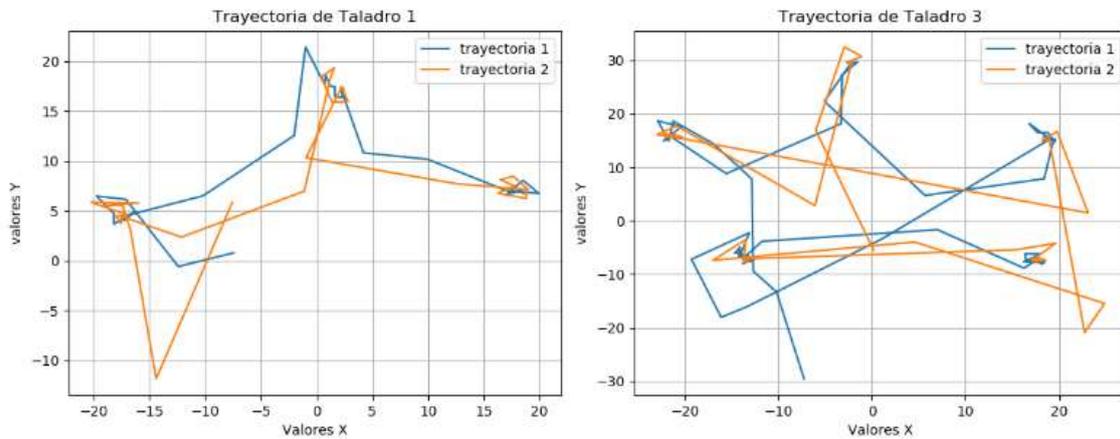


Figura 3.12 Trayectorias del ejercicio Taladros – Paciente 2

En la Figura 3.12 se observa las trayectorias del segundo paciente, se puede ver claramente que para el nivel 1 y 3, las trayectorias iniciales son un poco más dispersas, existen movimientos que no se acercan de forma directa a los huecos donde deben taladrar. Por otro lado, en las trayectorias 2 de cada nivel se observa movimientos directos; es decir, los movimientos van de forma rápida hacia los distintos huecos de las paredes. Esto muestra un aumento en la agilidad del manejo del dispositivo, también denota un aumento en la musculatura, ya que al finalizar la terapia este paciente llegó a manejar los niveles con el máximo grado de peso programado.

Para que el fisioterapeuta pueda evidenciar el avance de los pacientes se registró varios ítems principalmente el tiempo de ejecución de cada nivel y el número de errores o aciertos que el paciente tuvo durante la escena. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la base de datos durante las distintas sesiones de rehabilitación.

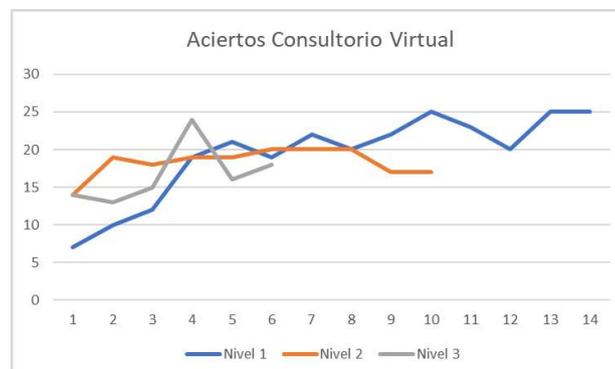


Figura 3.13 Cantidad de aciertos obtenidos en el ejercicio consultorio.

En la Figura 3.13 se observa el histórico de un paciente, en su eje X tenemos la cantidad de veces que realizó el ejercicio y en el eje Y la cantidad de aciertos que tuvo en cada uno de estos intentos. Se puede apreciar que para los 3 distintos niveles, el número de aciertos obtenidos en los 120 segundos de ejecución del nivel aumentan considerablemente respecto a la primera vez; es decir, el paciente obtuvo más aciertos al final de la terapia, esto en palabras de los fisioterapeutas comprueba la mejoría en la precisión del paciente.

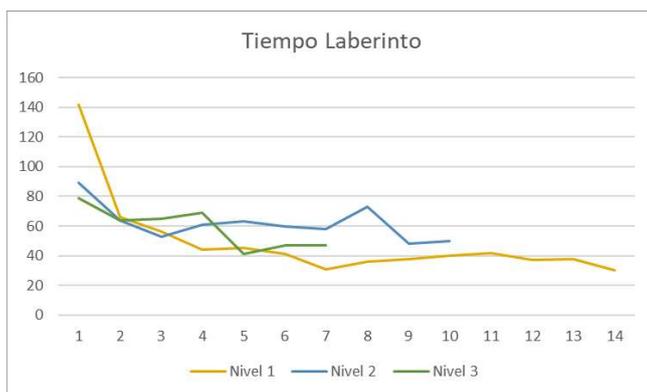


Figura 3.14 Tiempo (seg) de cada nivel de Laberintos

En la Figura 3.14 se observa una gráfica que presenta la cantidad de tiempo en segundos que un paciente se demoró en finalizar cada uno de los laberintos propuestos en sus distintos intentos. Se puede apreciar que este tiempo fue disminuyendo en cada ocasión, lo que muestra un avance en la precisión de movimientos del paciente.

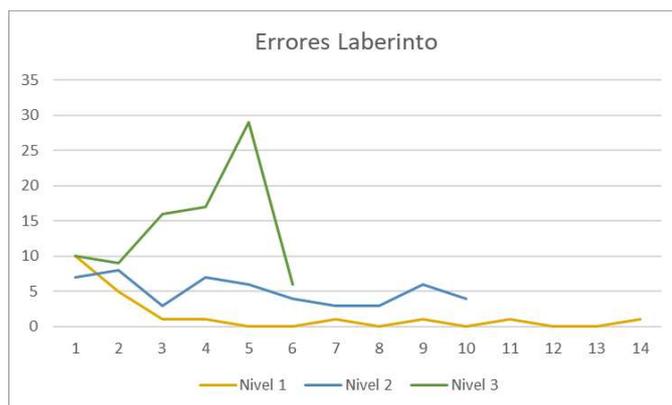


Figura 3.15 Errores cometidos en los niveles de Laberintos

En la Figura 3.15 se observan los errores cometidos por un paciente en cada laberinto, en el nivel 1 y 2 se puede ver que conforme se desarrollaba la rehabilitación la cantidad de errores disminuía. En el nivel 3, por otro lado, se puede observar que los errores incluso

llegaron a aumentar debido a la dificultad de este nivel porque sus paredes eran muy estrechas.

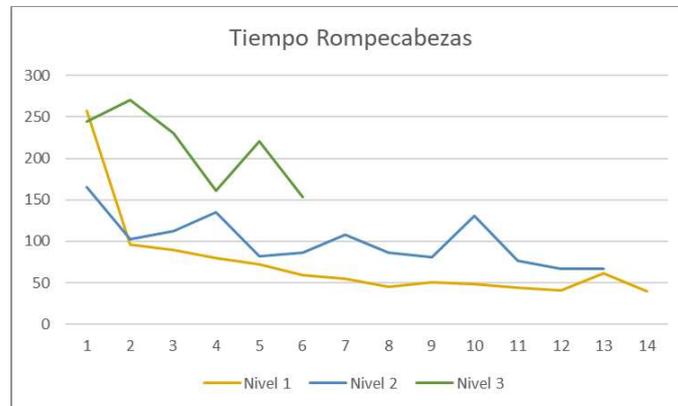


Figura 3.16 Tiempo requerido en cada nivel de Rompecabezas

En la Figura 3.16 se puede apreciar que, a medida que la terapia se desarrollaba, la cantidad de tiempo que el paciente se demoraba en finalizar cada rompecabezas iba disminuyendo. Los picos existentes a lo largo de las gráficas pueden ser justificados con el aumento en la emulación de peso que se realizaba cada cierto tiempo, lo que suponía una dificultad extra para el paciente.

3.4.2 ENCUESTAS Y COMENTARIOS

Una vez que todos los pacientes terminaron su rehabilitación se realizó una encuesta general sobre la utilización del dispositivo, tanto a ellos como a los especialistas. Entre los comentarios finales de los fisioterapeutas sobre el sistema de rehabilitación desarrollados están los siguientes:

- La rehabilitación en sí utiliza algunos instrumentos, aparatos, técnicas, por lo cual es muy difícil poner diferencias entre un sistema tradicional de terapia con y sin el uso del sistema háptico. El objetivo de la rehabilitación actual es ser dinámica, no protocolizada y que se use métodos novedosos y sobre todo eficientes. El sistema háptico propuesto es una opción para la rehabilitación “moderna” en Ecuador.
- Este sistema puede suplir ciertos ejercicios de rehabilitación, ya que tiene múltiples características que se pueden acoplar a cada paciente y, dependiendo su programación, puede ser aplicado en diferentes campos de la terapia física; sin embargo, no es un dispositivo que supla a toda una sesión de rehabilitación, sino más bien un dispositivo que complementa de forma eficaz una terapia.

- Es un sistema de fácil control y manipulación, tanto para el profesional como para el paciente, brindando así una alternativa novedosa, entretenida y eficaz de terapia.
- El sistema háptico, si es aprovechado y utilizado con responsabilidad y acorde la patología de cada paciente, puede ser 100% útil y eficaz; es necesario educar al profesional para que pueda manipularlo con destreza y así se pueda trabajar conjuntamente con el paciente. Desde el criterio del fisioterapeuta este sistema es novedoso para las personas por lo que tendrá una gran aceptación por parte de los pacientes.
- En el caso del proyecto efectuado, la aceptación de los pacientes tratados fue del 100%, ya que fue algo fácil de aprender, manejar y novedoso al mismo tiempo. A su vez, permitió mejorar significativamente los parámetros iniciales como la fuerza muscular, rango de movilidad o precisión en cada paciente tratado.
- El sistema háptico es eficiente para el campo de la rehabilitación, siempre y cuando el profesional de la salud sepa manejarlo y aprovechar sus múltiples características a la hora de la rehabilitación; es decir, se verán resultados óptimos solamente si se tiene el conocimiento de cómo y cuándo se puede utilizar el sistema.

Para las encuestas realizadas se utilizó una escala de calificación del 1 al 5, donde 1 es la mínima puntuación y 5 la máxima puntuación. En la Figura 3.17 se muestran los resultados de las encuestas de los 5 pacientes y en la Figura 3.18 se muestran los resultados de las encuestas de los fisioterapeutas.

Preguntas	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3	Paciente 4	Paciente 5
Considera que la implementación del sistema en su terapia ha contribuido en su recuperación	5	4	5	4	5
En términos generales cómo calificaría a la colocación, manipulación y uso del sistema completo.	4	5	4	4	5
El nivel de dificultad el uso del software (instrucciones) fue adecuado para la realización de los ejercicios	4	5	5	4	5
Considera que la inclusión de indicadores visuales le permitió ganar conciencia sobre el ejercicio que está realizando.	5	5	5	5	5
¿Cuál fue el soporte presentado por el sistema durante la terapia física?	4	4	4	5	5
Recomendaría la incorporación permanente del sistema durante las sesiones de rehabilitación	5	5	5	5	5

Figura 3.17 Resultados de las encuestas realizadas a los pacientes

Se puede observar que el sistema de rehabilitación desarrollado fue muy bien recibido por todos los pacientes e inclusive todos estos recomiendan la incorporación permanente del sistema en la rehabilitación. Además, uno de los pacientes era zurdo, por lo que el sistema tenía que ser acondicionado cuando este paciente lo utilizaba, pero por su respuesta en la

pregunta sobre la colocación y manipulación del dispositivo se puede ver que esto no afectó a su utilización ni incomodó su manipulación

Preguntas	Fisioterapeuta 1	Fisioterapeuta 2
Califique la importancia que le daría a un sistema que le brinde soporte de rehabilitación pasiva de muñeca	4	4
En términos generales cómo calificaría a la manipulación y uso del sistema completo	Fácil	Fácil
El uso del software le pareció complicado o le trajo inconvenientes considerables	No	Medio
Considera que el equipo es útil y práctico para entrenarse/ejercitarse/rehabilitarse	Muy útil	Muy útil
Considera que el uso de indicadores visuales permite ganar conciencia sobre el ejercicio que se está realizando	Mucho	Medio
Que tan ventajoso le parece mantener un registro histórico en cada sesión del paciente	Muy útil	Muy útil
Cual es el soporte presentado por el sistema durante la ejecución de la terapia física	4	4
Usted recomendaría la incorporación permanente del sistema durante las sesiones de rehabilitación.	Si	Si
Dentro de las sesiones de rehabilitación como calificaría el progreso de los pacientes al usar el sistema frente a no usarlo	Igual	Igual
Califique su satisfacción con el sistema	4	4
Que movimientos cree que el sistema permite desarrollar		
Flexión	X	X
Extensión	X	X
Desviación Cubital	X	X
Desviación Radial	X	X
Circunducción	X	X

Figura 3.18 Resultados de las encuestas realizadas a los fisioterapeutas

En las encuestas de los pacientes se puede ver que en general la aceptación del sistema fue bastante buena y es considerado una herramienta muy útil para la rehabilitación pasiva de este tipo de patologías. Además, se puede observar que ambos especialistas consideran que el sistema maneja los principales movimientos de muñeca necesarios para la rehabilitación. También consideran que el tiempo de rehabilitación con y sin el sistema es el mismo, lo cual demuestra su efectividad para realizar la terapia, obteniendo resultados en el mismo tiempo que los sistemas tradicionales utilizados. Las encuestas realizadas se encuentran en el Anexo D.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Sobre la base del estudio anatómico se determinaron los ejercicios motrices que cumplan con los ejercicios de: flexión, extensión, desviación cubital y radial. Además, se notó la necesidad de un sistema de apoyo de antebrazo y un eje de prensión fina con la finalidad de ayudar a paciente durante la terapia.
- A pesar que el software Unity 3D no posee un soporte nativo para el dispositivo haptico Novint Falcón, la comunicación fue posible usando elementos externos como una librería dinámica y una aplicación que actúe como un intermediario entre esta librería y la interfaz de usuario diseñada.
- La interfaz de usuario tiene objetos virtuales que son recreados en la librería dinámica para la realimentación de fuerza, esto se logra por medio de las mallas que recubren a este objeto, por esto el uso de figuras de ángulos planos reduce la carga computacional y permite un manejo más fluido de la interfaz por parte del paciente.
- La programación, manejo y visualización de la base de datos se lo hace a través de la interfaz de usuario. Por este motivo se implementaron sub pantallas que permitan acceder a la base de datos sin recurrir a programas externos.
- Los niveles del ejercicio denominado consultorio al usar mayor cantidad de objetos que pueden generar realimentación de fuerza y al usar figuras con bordes redondeados es el ejercicio que mayor carga computacional genera.
- La interfaz de usuario desarrollada con los 4 ejercicios motrices y sus niveles de dificultad demostró ser una ayuda al paciente en proceso de rehabilitación y para los fisioterapeutas en mantener una ficha medica con los históricos de sus pacientes para asignar niveles de dificultad durante el proceso de recuperación.
- La interfaz de usuario fue probada exitosamente en computadoras portátiles y de escritorio de distintas características, funcionando correctamente el 93% de las veces, lo cual muestra la versatilidad de la interfaz para ser ejecutada en diferentes dispositivos.
- La base de datos de los usuarios es una ayuda al fisioterapeuta, ya que permite tener un seguimiento de los resultados obtenidos por los pacientes en cada sesión.

- El sistema desarrollado demostró ser funcional en pacientes con las patologías de: fracturas, tendinitis de Quervain, neuralgia del nervio mediano, cubital o radial y túnel carpiano.
- El sistema de rehabilitación fue usado por pacientes de distintas afecciones y en cada uno de los casos, como muestran los resultados, los fisioterapeutas determinaron una mejoría considerable en la movilidad activa y pasiva de la muñeca.
- En la tabulación de las evaluaciones físicas realizadas a los pacientes al inicio y al final del tratamiento se comprueba una mejoría en el rango de movilidad, el nivel de fuerza y una disminución de dolor.
- Las encuestas realizadas a los pacientes demuestran una alta aceptación al sistema de rehabilitación debido a la facilidad del uso del software, a la intuitiva manipulación del sistema háptico y los resultados obtenidos en la rehabilitación.
- En base a opiniones de los fisioterapeutas, se concluye que los resultados obtenidos por los pacientes son satisfactorios, lo cual implica la funcionalidad del sistema al ayudar a los pacientes a tener una recuperación considerable en su afección y a mejorar su coordinación mano-vista.
- Aunque el enfoque del sistema es la rehabilitación activa de muñeca, el sistema puede ser modificado para ser usado en pacientes con afecciones neurológicas como ictus y pacientes en recuperación de derrames cerebrovasculares. Además, puede ser usado en personas de tercera edad para mejorar la coordinación mano-vista, concentración y la motricidad fina.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es necesario que el fisioterapeuta esté presente durante la sesión para supervisar que el paciente realice los ejercicios motrices de manera adecuada y haya recibido la correcta capacitación del uso del dispositivo por personal técnico.
- El dispositivo háptico debe posicionarse en algunos ejercicios, por lo cual, se recomienda no manipular el dispositivo háptico mientras la interfaz de usuario muestre el mensaje de precaución.
- Se recomienda seguir todos los pasos de instalación indicados en el manual de usuario del ANEXO A.

- Como una mejora al sistema se plantea la posibilidad de realizar un sistema de medición en grados de los movimientos activos de flexión, extensión, desviación cubital y radial. Esta información debe ser almacenada en la base de datos como una ayuda al fisioterapeuta.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Newport, "Ventajas de la rehabilitación asistida mediante robot en la recuperación de las funciones motriz y visuoespacial en pacientes en fase de recuperación de un accidente cerebrovascular," *Rev. Esp. Geriatr. Gerontol.*, vol. 41, no. Supl 2, pp. 66–73, 2006.
- [2] C. D. E. I. Mecánica, D. E. M. Con, and G. D. E. Libertad, "Desarrollo de un prototipo automático para rehabilitación de muñeca con 2 grados de libertad," Universidad Politécnica Saleciana, 2018.
- [3] C. Eduardo, M. Gonzalez, M. Benet, R. Fernando, and M. Martínez, "El complejo articular de la muñeca : aspectos anatófisiológicos y biomecánicos , características , clasificación y tratamiento de la fractura distal del radio The Wrist Joint Complex : Anatomical , Physiological and Biomechanical Aspects , Characteristics," pp. 430–446, 2016.
- [4] A. I. Kapandji, *Fisiología Articular*, 6th ed. Madrid, 2006.
- [5] M. H. Cruz and G. Dominguez, "Diseño y accionamiento de un dispositivo rehabilitador de muñeca," Instituto Politécnico Nacional, 2013.
- [6] K. Moore, A. Dailey, and A. Agur, *Anatomía con Orientación Clínica*, 7th ed. 2013.
- [7] H. Hislop and J. Montgomery, *Pruebas Funcionales Musculares*, 6th ed. California.
- [8] D. D. A. Javier, "Lesiones tendinosas de mano y muñeca en el ambito laboral," p. 45, 2008.
- [9] Healthwise, "Lesiones de los dedos, de las manos y de las muñecas | NorthShore," 2018. [Online]. Available: <https://www.northshore.org/healthresources/encyclopedia/encyclopedia.aspx?DocumentHwid=handi&Lang=es-us>. [Accessed: 24-Jun-2019].
- [10] S. B. Brotzman, "Lesiones de muñeca y mano," España, 2012, p. 54.
- [11] DRA.YNGHEBORTH DEL CARMEN ROBY CEVALLOS, "Evolución De La Sintomatología En La Descompresión Del Nervio Mediano a Nivel De La Muñeca

- Postcirugía En El Area De Cirugía Plástica Del Hospital Teodoro Maldonado Carbo, 2014-2015,” p. 71, 2015.
- [12] M. C. Idrovo and M. V. Lazo, “Prevalencia del síndrome del túnel del carpo em los ayudantes de secretaría y secretarias departamentales de la universidad de cuencua, en el año 2011 - 2012,” p. 57, 2013.
- [13] N. de los Á. Ramón Cruz, “Aplicación del tratamiento fisioterapéutico de reeducación postural global, en el síndrome del túnel carpiano a las secretarias de la universidad técnica de aAmbato, periodo Enero, Abril 2014.,” *Univ. Técnica Ambato Fac. Ciencias La Salud Carrera Ter. Física*, p. 115, 2014.
- [14] J. L. Castro Segura, “Comportamiento de la fijación percutanea de fractura escafoides y complicaciones tempranas y tardias en el Servicio de Ortopedia del Hospital Calderon Guardia, de enero de 2007 a marzo de 2014,” p. 41, 2015.
- [15] fisioonline, “NEURALGIA DEL NERVIO CUBITAL. TRATAMIENTO RECOMENDADO,” *Journal of Hand Surgery*, 31-Aug-2015. [Online]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/articulos/neuralgia-del-nervio-cubital-tratamiento-recomendado>. [Accessed: 01-Jul-2019].
- [16] D. Toaquiza, “Efectividad de la intervencion fisioterapéutica integral en los trastornos muscoesqueleticos en la provinciaa de tungurahua,” *Univ. Técnica Ambato Fac. Ciencias La Salud Carrera Ter. Física*, p. 115, 2014.
- [17] C. Davila and B. Veronica, “Tratamiento fisioterapéutico en lesiones del nervio radial,” 2018.
- [18] L. Riggioni, “Terapias pasivas y activas | Terapia Física Costa Rica y Rehabilitación Neurológica - Dra. Lisa Riggioni.” [Online]. Available: <https://neuroft.com/es/terapias-pasivas-y-ejercicio-terapeutico/>. [Accessed: 29-Jun-2019].
- [19] M. Delgado and M. Garcia, “Medicina de Rehabilitación BIOMECÁNICA.” [Online]. Available: <http://www.sld.cu/sitios/rehabilitacion-bio/temas.php?idv=20735>. [Accessed: 29-Jun-2019].
- [20] Rodriguez.H and L. Arias, “Ejercicios de mano y muñeca.” [Online]. Available: <https://traumatologiahellin.wordpress.com/page/1/>. [Accessed: 30-Jun-2019].
- [21] “EJERCICIOS BASICOS PARA LA MUÑECAS.”

- [22] G. Urbano, “Guía de rehabilitación de una lesión de muñeca | Deusto Salud,” 2016. [Online]. Available: <https://www.deustosalud.com/blog/rehabilitacion/guia-rehabilitacion-lesion-muneca>. [Accessed: 01-Jul-2019].
- [23] P. Physio, “Mesa De Manos Universal,” 2017. [Online]. Available: <https://www.primphysio.es/productos/mesa-de-manos-universal/>.
- [24] D. Galeano and I. Electr, “Robótica Médica.”
- [25] A. E. y M. SL, “InMotion robots de miembro superior,” 2018. [Online]. Available: <http://www.aemedi.es/inmotion.htm>. [Accessed: 01-Jun-2019].
- [26] J. A. Acevedo Londoño, E. Caicedo Bravo, and J. F. Castillo García, “Aplicación de tecnologías de rehabilitación robótica en niños con lesión del miembro superior,” *Rev. la Univ. Ind. Santander. Salud*, vol. 49, no. 1, pp. 103–114, 2017.
- [27] A. G. R. L. Á. Jarillo Silva and Ortiz Mesina Mónica del S., “Uso del sistema háptico con fines en el área de evaluación , rehabilitación y diagnóstico motriz en miembros superiores,” vol. 18, pp. 19–29, 2014.
- [28] O. E. L. Maallem, “Trabajo de dispositivos de interacción : Dispositivos hápticos y de realimentación de fuerza (Phantom).”
- [29] H. H. Cortés, C. México, and M. A. García, “Diseño y Desarrollo de un Dispositivo Háptico con Aplicaciones para Entornos Educativos,” *Sist. Cibernética E Informática*, vol. 7, pp. 46–49, 2010.
- [30] 3D Systems Inc, “Escáneres y dispositivos hápticos | 3D Systems.” [Online]. Available: <https://es.3dsystems.com/scanners-haptics>. [Accessed: 04-Jun-2019].
- [31] M. L. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería., J. M. Sabater Navarro, and J. Sofrony Esmeral, *Ingeniería e investigación.*, vol. 31, no. 1. [Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería], 2011.
- [32] “Capacidad | Experimente las ventajas de SOLIDWORKS.” [Online]. Available: https://www.solidworks.es/sw/why-solidworks/10754_ESN_HTML.htm. [Accessed: 24-Jun-2019].
- [33] T. Anderson, “N O V I N T Joint Submitters Submitting Organization.”
- [34] S. B. Nagaraj and D. Constantinescu, “Effect of haptic force feedback on upper limb,” *2009 2nd Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol. ICETET 2009*, no. June, pp. 55–58, 2009.

- [35] Anónimo, "Mango de bola de halcón." [Online]. Available: <https://hapticshouse.com/collections/handles/products/falcon-ball-handle>. [Accessed: 28-Aug-2019].
- [36] Anónimo, "FalconUnity," 2017. [Online]. Available: <https://github.com/kbogert/falconunity/blob/master/README.md>.
- [37] Ecured, "Unity3D - EcuRed." [Online]. Available: <https://www.ecured.cu/Unity3D>. [Accessed: 01-Sep-2019].
- [38] Academia android, "Colliders: detección de colisiones en videojuego Unity 3D – Academia Android," 2016-09-16. [Online]. Available: <https://academiaandroid.com/colliders-deteccion-colisiones-juego-unity-3d/>. [Accessed: 01-Sep-2019].
- [39] F. Rommel, "SQLite: La Base de Datos Embebida." [Online]. Available: <https://sg.com.mx/revista/17/sqlite-la-base-datos-embebida>. [Accessed: 06-Aug-2019].
- [40] Andres, "MySQL vs SQLite: ¿Cuál es mejor?" [Online]. Available: <https://guiadev.com/mysql-vs-sqlite/>. [Accessed: 06-Aug-2019].
- [41] R. Velasco, "DB Browser for SQLite: software para crear y editar bases de datos SQLite," 2018. [Online]. Available: <https://www.redeszone.net/2018/06/30/db-browser-sqlite-bases-datos/>. [Accessed: 07-Aug-2019].

ORDEN DE EMPASTADO