

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA
LICENCIATURA EN BIOINGENIERÍA MÉDICA
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN PROFESIONAL



“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR EN UN AMBIENTE VIRTUAL PARA LA RECUPERACIÓN DE LA MOVILIDAD DESPUÉS DE UN ACCIDENTE CEREBROVASCULAR Y FRACTURAS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN BIOINGENIERÍA MÉDICA

PRESENTA:

P.L.B.M MONSERRAT RÍOS HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN MANUEL JACINTO VILLEGAS

ASESOR DE TESIS:

DRA. ADRIANA H. VILCHIS GONZÁLEZ

REVISORES DE TESIS:

DR. JUAN PABLO JUAREZ PEGUEROS

DR. OTNIEL PORTILLO RODRIGUEZ

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

AGOSTO 2020

LISTADO DE ACRÓNIMOS

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

ENADID: Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica

ACV: Accidente Cerebrovascular

MS: Miembro Superior

TMIR: Terapia de movimiento inducido por restricción

FNP: Facilitación Neuromuscular Propioceptiva

RV: Realidad virtual

AV: Ambiente virtual

CM: Conocimiento del Movimiento

CR: Conocimiento de Resultados

IMU: Unidad de Medición Inercial

CEERE: Centro Estatal de Rehabilitación y Educación Especial

CICMED: Centro de Investigación en Ciencias Médicas

UDP: User Datagram Protocol

HMD: Head Mounted Display

PC: Computadora Personal

DH: Dispositivo Háptico

EF: Efecto Final

SUS: Escala de Usabilidad de un Sistema

DC: Corriente Directa

PWM: Pulse Width Modulation

UAEMéx: Universidad Autónoma del Estado de México

ÍNDICE GENERAL

LISTADO DE ACRÓNIMOS.....	1
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
JUSTIFICACIÓN.....	15
META DE INGENIERÍA.....	17
OBJETIVOS.....	17
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	18
1.1 Accidente cerebrovascular.....	18
1.1.1 Secuelas del ACV.....	18
1.1.2 Rehabilitación después de un ACV.....	19
1.2 Fracturas	20
1.2.1 Complicaciones de las fracturas	21
1.2.2 Rehabilitación después de la consolidación de la fractura	22
1.3 Rehabilitación motriz	24
1.3.1 Ambientes virtuales en la rehabilitación.....	25
1.3.2 Aprendizaje motor y neuroplasticidad	27
1.4 Diseño de ambientes virtuales.....	30
1.5 Evaluación de un sistema.....	33
1.5.1 Evaluación de la experiencia de usuario.....	33
1.5.2 Evaluación de la usabilidad	34
CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE	35
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL SISTEMA	46
3.1 Identificación de ejercicios terapéuticos y caracterización del desempeño del paciente.....	47
3.1.1 Identificación de ejercicios terapéuticos.....	49
3.1.2 Caracterización del desempeño de los usuarios.....	50
3.2 Diseño del ambiente virtual.....	51
3.2.1 Material.....	51
3.2.2 Propuesta de tareas y definición de niveles de dificultad de los espacios virtuales.....	53

3.2.3	Escenarios virtuales en la plataforma Unreal Engine 4.....	64
3.2.4	Retroalimentación.....	66
3.2.5	Diseño de interfaz de usuario	68
3.3	Integración de la interfaz háptica con el ambiente virtual.....	73
3.3.1	Descripción de la interfaz háptica	73
3.3.2	Comunicación entre el AV y la interfaz háptica.....	75
3.3.3	Integración del DH con el ambiente virtual.....	76
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE REHABILITACIÓN		82
CAPÍTULO V: PRUEBAS Y RESULTADOS		99
5.1	Pruebas de usabilidad y funcionamiento.....	99
5.2	Resultados	104
5.3	Discusión de resultados.....	116
CONCLUSIONES.....		120
IMPLICACIONES ÉTICAS.....		122
BIBLIOGRAFÍA.....		124
ANEXOS.....		136
Anexo 1: Cuestionario 1. Sobre la rehabilitación de miembro superior posterior a un accidente cerebrovascular.....		136
Anexo 2: Cuestionario 2. Evaluación de la interfaz de usuario por personal especializado.		141
Anexo 3: Cuestionario 3. Evaluación de la usabilidad y funcionalidad del sistema.		144
Anexo 4: Ubicación de los componentes del Sistema de Rehabilitación.		150
Anexo 5: Dictamen del Comité de Ética en Investigación.....		151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes del sistema de rehabilitación Rapael. Tomado de (89).....	35
Figura 2: Juegos de entrenamiento del sistema de rehabilitación Rapael. Modificado de (89).....	36
Figura 3:Juegos a) “The Hummingbird Hunt” y b) “The hammer task”. Tomado de (13).	36
Figura 4: AV para la rehabilitación de hombro. Tomado de (7).	37
Figura 5: Escena de rehabilitación de hombro y codo. Tomado de (7).....	38
Figura 6: Paciente después de un ACV utilizando el Exoesqueleto UL-EXO7. Tomado de (90).	38
Figura 7: DH Phantom-Omni® de la empresa Sensable Technologies. Tomado de (92).....	39
Figura 8: AV para la familiarización del paciente con interfaces hápticas. Tomado de (41).	40
Figura 9: AV para medir el desempeño del paciente. Modificado de (41).....	40
Figura 10: Oculus rift, Novint falcon y Leap motion. Modificado de (93).....	41
Figura 11: Juego de guitarra para rehabilitación de movimientos finos. Tomado de (65).....	41
Figura 12: Ambientes virtuales a) Natural y b) Urbano) que permiten la retroalimentación háptica. Tomado de (65).	42
Figura 13: a) y b) Juegos interactivos de Gloreha Aria para rehabilitar la parte motora. c) y d) juegos para rehabilitar la parte cognitiva. Modificado de (96).....	42
Figura 14: Metodología para el desarrollo del sistema de rehabilitación de MS.	46
Figura 15: Número de pacientes que al sufrir un ACV se ve afectado su miembro superior.	47
Figura 16: Rango de edad de los pacientes con ACV tratados por los terapeutas encuestados.	48
Figura 17: Duración de una sesión promedio de terapia física.....	49
Figura 18: Diagrama del diseño de los ambientes virtuales del sistema de rehabilitación propuesto. ..	52
Figura 19: Base station 2.0 y Vive Pro HMD de HTC (104,105).....	53
Figura 20: Representación de los movimientos en los ejes (X, Y, Z) en el escenario Figuras.	54
Figura 21: Concepto del primer escenario “Caja”.....	54
Figura 22: Concepto del escenario “Figuras”.	55
Figura 23: Concepto del escenario “Anaqueles”.	57
Figura 24: Concepto del escenario “Laberinto”.	58
Figura 25: Concepto del escenario “Apilar”.	59
Figura 26: Concepto del escenario “Lanzamiento”.	60
Figura 27: Concepto del escenario “Pintura”.....	61
Figura 28: Concepto del escenario “Atrapar”.	62
Figura 29: Primera versión del escenario virtual “Figuras”.	64
Figura 30: Primera versión del escenario virtual “Anaqueles”.	65
Figura 31: Primera versión del escenario “Atrapar”.....	65

Figura 32: Primera versión del escenario virtual “Apilar”	66
Figura 33: Ejemplo del envío de datos PWM.	67
Figura 34: Menú principal del AV.	69
Figura 35: Submenú de Crear Cuenta.	69
Figura 36: Submenú de Iniciar Sesión.	70
Figura 37: Submenús para elegir la dificultad de los escenarios virtuales.....	73
Figura 38: DH de 3 grados de libertad.	74
Figura 39: Corte transversal del efector final de DH.....	75
Figura 40: Diagrama del funcionamiento del sistema de rehabilitación.	76
Figura 41: Comunicación entre el AV y los dos modelos Simulink®.....	77
Figura 42: Secciones de la comunicación entre el AV y el DH del modelo Simulink® “Host”.	79
Figura 43: Componentes del Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior.	80
Figura 44: Caja impresa en 3D que contiene el controlador electrónico del DH.	81
Figura 45: Vista frontal de la caja donde contiene la entrada para un puerto mini USB y Micro USB... 81	
Figura 46: Gráfico sobre el uso del Sistema de Rehabilitación en el campo clínico.	83
Figura 47: Diagrama de pares de la evaluación del Sistema de Rehabilitación por terapeutas.....	84
Figura 48: Representación del tipo de sistema que es el Sistema de Rehabilitación.	85
Figura 49: Versión final del escenario virtual “Figuras” y sus elementos.	87
Figura 50: Versión final del escenario virtual “Anaqueles”.....	88
Figura 51: Versión final del escenario virtual “Atrapar” y sus elementos.	89
Figura 52: Versión final del escenario “Apilar” y sus elementos.	90
Figura 53: Cambio de color en la lista de compras en el escenario “Anaqueles”.....	91
Figura 54: Retroalimentación visual en el escenario “Apilar”.....	91
Figura 55: Diagrama de bloques de los menús del AV.....	92
Figura 56: Menú principal.	93
Figura 57: Submenú Crear Cuenta.	94
Figura 58: Submenú de Evaluación Clínica.	95
Figura 59: Pantallas de las escalas clínicas.....	96
Figura 60: Submenú de juegos.	96
Figura 61: Menú de niveles del escenario “Figuras”.....	97
Figura 62: Inicio del juego “Atrapar”.....	97
Figura 63: Pantalla de “Fin de Juego”.....	98
Figura 64:Diagrama sobre las fases de la evaluación.	102
Figura 65: Mecanismo Cardán de plástico en el EF.....	104

Figura 66: Diagrama de pares de la evaluación del Sistema de Rehabilitación por usuarios sanos...	107
Figura 67: Representación del tipo de sistema que es el Sistema de Rehabilitación según los usuarios.	108
Figura 68: Evaluación del AV después de utilizar el monitor.	109
Figura 69: Evaluación del AV después de utilizar el HMD.....	110
Figura 70: Evaluación de DH con el monitor.	111
Figura 71: Evaluación del DH con el HMD como dispositivo de visualización.	112
Figura 72: Comparación entre el monitor y el HMD.	113
Figura 73: Mejor desempeño obtenido en los juegos del AV.....	115
Figura 74: Omni Phantom.....	139
Figura 75; Distancias entre los componentes del Sistema de Rehabilitación	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fracturas más comunes en el miembro superior (34).	23
Tabla 2: Atributos del aprendizaje motor y su uso con la RV en la rehabilitación (43,66,67).	29
Tabla 3: Características de los canales de comunicación de un AV (69).	30
Tabla 4: Características para el diseño de terapia ocupacional según la habilidad que se desea mejorar (71).	31
Tabla 5: Escala de grados con el puntaje de la escala SUS (86).	34
Tabla 6: Características importantes de los sistemas de rehabilitación de MS.	44
Tabla 7: Actividad del MS que realiza el usuario en el escenario “Cajas”	55
Tabla 8: Actividad del MS que realiza el usuario en el escenario “Figuras”	56
Tabla 9: Actividad del MS que realiza el usuario en el escenario “Anaqueles”	57
Tabla 10: Movimientos que el usuario realizará en el escenario “Laberinto”.	58
Tabla 11: Actividad del MS del usuario en el escenario “Apilar”.	59
Tabla 12: Actividad del MS que el usuario realiza en el escenario “Lanzamiento”.	60
Tabla 13: Actividad del MS que el usuario realizará en el escenario “Pintura”.	62
Tabla 14: Función de los botones del Menú Principal.	68
Tabla 15: Resultados de que escalas son útiles en el Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior.	85
Tabla 16: Resultados de qué tipo de elección para elegir la dificultad prefieren los terapeutas	86
Tabla 17: Resultados de la escala SUS con el monitor y el HMD.	106
Tabla 18: Desempeño de los usuarios en cada uno de los 13 niveles.	114
Tabla 19: Desempeño y características de los usuarios.	115

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior en un Ambiente Virtual para la recuperación de la movilidad.

Actualmente los sistemas de rehabilitación que incluyen ambientes virtuales permiten la repetición de los ejercicios sin la monotonía de la terapia tradicional, así mismo brindan herramientas a los terapeutas para ofrecer una terapia personalizada a los pacientes según sus necesidades y sus capacidades.

El primer paso para el desarrollo de este sistema fue el acercamiento con terapeutas mediante la aplicación de cuestionarios para obtener información sobre las terapias que realizaban las personas que sufrieron un ACV o fracturas para rehabilitar el MS y recuperar su movilidad. Posteriormente con esta información y la recabada mediante el marco teórico se realizaron las propuestas de los escenarios virtuales que contemplaran retos cognitivos, simulación de actividades diarias y juegos interactivos que permitieran mantener el interés a la terapia. De estos escenarios propuestos solo cuatro se seleccionaron ya que se buscó la compatibilidad en los movimientos del DH y la retroalimentación de un terapeuta.

Con los cuatro escenarios diseñados y programados dentro del motor de juego Unreal Engine 4, se realizó la primera evaluación del sistema por parte de personal especializado (terapeutas). Mediante las observaciones y los resultados de esta evaluación se realizaron modificaciones al sistema para obtener la segunda versión del sistema y para de este modo poder realizar la segunda evaluación dirigida a sujetos sanos.

En la segunda evaluación se obtuvieron los resultados de 10 sujetos sanos, de distintas edades, sexo y con diferentes grados de acercamiento a la RV, en donde se observó una usabilidad promedio de 85.25, representando una calificación A+, mientras que los resultados del cuestionario AttrakDiff fueron altos reflejándose en la descripción del sistema como un sistema deseado que cumplía con las características tanto hedónicas como pragmáticas.

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona que la discapacidad es parte de la condición humana y que casi todas las personas en algún momento de su vida sufrirán algún tipo de discapacidad, ya sea transitoria o permanente (1).

En el 2018 el INEGI publicó los resultados de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID) en México, en la cual reportó que en ese año existía un porcentaje de 6.3% de población con discapacidad, de las cuales el 17.8% movían o usaban los brazos y manos con dificultad (2). Las consecuencias de la discapacidad se ven reflejadas directamente en la calidad de vida de las personas y de la gente que la rodea, y si bien en muchas ocasiones las personas no pueden recuperar la funcionalidad total de la parte afectada, sí existen soluciones de rehabilitación que les permiten mejorar su calidad de vida.

Es por ello que en el ámbito de rehabilitación existe un desarrollo continuo para mejorar la terapia del paciente y para que el terapeuta tenga herramientas que le faciliten observar tanto el desarrollo del paciente como para hacer las terapias más efectivas.

Un ejemplo de estos desarrollos son los sistemas de rehabilitación que utilizan ambientes virtuales que permiten la repetición de movimientos sin la monotonía de la terapia convencional, lo que aumenta su motivación y evita su deserción; mientras que a los terapeutas les permite llevar un seguimiento del progreso del paciente, así como variar la dificultad de los ejercicios (3–5).

Uno de los retos principales que intentan atacar estos sistemas de rehabilitación es la falta de participación y constancia en la rehabilitación que se ve reflejado en poca motivación por parte del paciente, ya que es uno de los factores que afectan la recuperación del paciente (6). Estos sistemas utilizan la inmersión y la retroalimentación para mantener interesado e informado al paciente sobre sus movimientos en el ambiente virtual (4).

En el presente proyecto se tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de rehabilitación del miembro superior con un ambiente virtual (AV) donde el usuario pueda interactuar mediante un dispositivo háptico (DH) que permita realizar movimientos utilizados en la terapia convencional para lograr recuperar la movilidad del miembro afectado.

El alcance de este proyecto es evaluar la usabilidad del sistema, así como la experiencia del usuario.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La rehabilitación física del miembro superior (MS) en personas con problemas de movimiento, por ejemplo, los que han sufrido un accidente cerebrovascular (ACV) o los que han sufrido una fractura, es de gran importancia ya que permite recuperar el movimiento de brazos y manos para ser capaces de realizar tareas de la vida diaria. Sin embargo, existen diversos factores que afectan el progreso y el desempeño del paciente durante su rehabilitación y por lo tanto en su recuperación, uno de ellos es la participación y constancia en las terapias.

En el caso de la rehabilitación tradicional se han detectado algunas limitaciones que no permiten cubrir las necesidades de los pacientes provocando una desmotivación en estos, lo cual se ve reflejado en su participación, por ejemplo en ocasiones el paciente no logra observar su progreso, llegando a creer que la terapia no ha generado ningún cambio por lo que deciden abandonarla; o en algunos casos los ejercicios pueden parecer monótonos y aburridos, lo que provoca la disminución de interés y a su vez disminuye su motivación (6,7).

Cuando el paciente no tiene suficiente motivación es probable que deserte, y en ese caso se mantiene la alteración de la función, la limitación de las actividades y la participación de la persona en el ámbito laboral y social, lo que conlleva a la discapacidad (8).

En la actualidad existen diversos sistemas de rehabilitación que han intentado disminuir estas limitaciones; algunos de ellos hacen uso de videojuegos comerciales para mantener el interés del paciente, sin embargo, el uso de este tipo de videojuegos puede llegar a ser contraproducente porque la retroalimentación que presentan está diseñada para personas sin ningún problema de movilidad y los pacientes se pueden frustrar porque no llegan a realizar los movimientos que espera el videojuego. Además, estos sistemas no le ofrecen al paciente una retroalimentación táctil que simule situaciones reales de una terapia tradicional, así mismo que le permitan practicar situaciones de la vida diaria en un ambiente seguro y flexible que permita la interacción con ambientes virtuales (9).

El desarrollo de estos sistemas de rehabilitación se centra más en la parte física, como en el desarrollo de exoesqueletos y de dispositivos hápticos, mientras que los escenarios virtuales no se describen a profundidad, modifican algunos juegos o se utilizan videojuegos comerciales, por lo que el desarrollo del AV se deja a un lado y no se diseña de acuerdo a las necesidades tanto de los terapeutas como de los usuarios. Por esta misma razón existen pocas evaluaciones de la usabilidad y de la experiencia del usuario respecto a la parte virtual.

Por esto, lo ideal es diseñar ambientes virtuales en forma de videojuegos que mantengan el interés del paciente, así como que aumente su motivación mediante retroalimentación y que se adapten a las necesidades y capacidades tanto de los terapeutas como de los pacientes. Así mismo evaluar estos escenarios y su integración en el sistema final.

En este trabajo se desarrolló un ambiente virtual que contiene diferentes escenarios virtuales que ayudan en la rehabilitación del miembro superior mediante la integración de retroalimentación visual, auditiva, táctil, de conocimiento de movimiento (CM) y de resultados (CR), que ayudan al usuario a realizar los ejercicios correctamente, al mismo tiempo que le permite visualizar la mejora que ha tenido mediante el despliegue de los tiempos al realizar cierta tarea. Los ambientes virtuales se desarrollaron en el motor de videojuegos Unreal Engine 4 por ser un software gratuito, así como por la cantidad de herramientas para crear ambientes en 3D y por su entorno gráfico de desarrollo.

Estos ambientes virtuales presentan diferentes grados de dificultad, a los cuales el paciente podrá acceder de acuerdo con los progresos que presente en su terapia. Los ambientes evitan la monotonía cambiando los escenarios y las tareas a realizar, así como su dificultad (tanto cognitiva como motora), lo cual le permite realizar un mayor número de actividades en su vida diaria.

Así mismo este trabajo presenta la evaluación de la usabilidad, la experiencia de usuario y el funcionamiento tanto del dispositivo háptico, de los escenarios virtuales y de la integración de todo el sistema.

JUSTIFICACIÓN

En el 2018 el INEGI reportó en los resultados de la ENADID que en México existió un aumento entre el año 2014 y el 2018, en el porcentaje de personas que presentan una discapacidad, pasando de 6% a 6.3% de la población y de los cuales un 17.8% tienen dificultad de mover o usar brazos o manos (2).

Esta discapacidad puede ser provocada por diferentes enfermedades o accidentes. Dentro de esas enfermedades se encuentra el ACV, la cual representa una de las enfermedades que consumen mayor número de recursos destinados al área de la salud y es una de las principales causas de discapacidad en adultos (6,10), por lo que el ACV no sólo afecta la vida del paciente disminuyendo su calidad de vida sino que también afecta a las personas que se encuentran a su alrededor (6). Esta enfermedad afecta a la población a nivel mundial, pues se estima que cada año provoca cinco millones de muertes, de las cuales dos tercios ocurren en países desarrollados. En estos países la muerte por ACV o sus consecuencias representan del 10 al 12% del total de los decesos, los cuales ocurren en personas menores de 65 años (11).

En México las enfermedades cerebrovasculares se consideran como un problema de salud de orden prioritario ya que en el 2015 se mostró un incremento continuo de la mortalidad por este padecimiento (12).

Una de las consecuencias del ACV son los problemas sensoriomotores, donde más del 85% de los pacientes sufren hemiparesia inmediatamente después del accidente (6) y entre el 80 y 95% de los pacientes continúan con impedimentos motores en las extremidades superiores después de seis meses del accidente provocándoles restricciones para realizar sus actividades diarias (13), por lo que sólo un número reducido de pacientes logran recuperar la función del miembro superior.

Por otra parte, se encuentran los accidentes, que dentro de sus consecuencias se encuentran las lesiones al sistema musculoesquelético, como las fracturas. Por ejemplo en un estudio realizado en el Instituto Nacional de Rehabilitación de México como Centro Colaborador de la OPS/OMS se analizaron 23584 expedientes, de los cuales un 54,56% contenía un diagnóstico relacionado a padecimientos que afectan al sistema musculoesquelético, donde un 20% se refería a fracturas (14).

Para atender las restricciones motoras, es recomendable que los pacientes tengan acceso a fisioterapia, sin embargo, actualmente este tipo de terapia presenta diferentes retos como la monotonía de los ejercicios, lo que muchas veces desmotiva al paciente provocando su deserción.

Actualmente se utilizan herramientas comerciales, como videojuegos o dispositivos hápticos, para hacer la terapia más interesante, sin embargo, estas herramientas al no estar diseñadas especialmente para rehabilitación pueden provocar efectos adversos como la frustración.

Por esta razón es una necesidad el desarrollar sistemas de rehabilitación que integren estrategias que permitan mantener la motivación del paciente para regresar y continuar con la terapia al mismo tiempo que sea capaz de observar sus progresos tanto en la parte motora como en la cognitiva permitiéndoles recuperar la funcionalidad del miembro superior para poder hacer uso de la mano y del brazo en su día a día y mejorar su calidad de vida.

META DE INGENIERÍA

Construir un sistema de rehabilitación de miembro superior conformado por un dispositivo háptico y un ambiente virtual desarrollado especialmente para la rehabilitación motora en personas que han sufrido un ACV o alguna fractura.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de rehabilitación de miembro superior conformado por un dispositivo háptico y un AV para la recuperación de la movilidad de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular o una fractura.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los ejercicios cinesioterapéuticos que el usuario podrá realizar en el ambiente virtual haciendo uso del dispositivo háptico.
- Identificar los parámetros que caracterizarán el desempeño de los usuarios en el sistema de rehabilitación de miembro superior.
- Diseñar los escenarios virtuales en el software Unreal Engine 4, en los cuales se desenvolverá el usuario para completar los ejercicios de cinesioterapia.
- Definir los niveles de dificultad de los espacios virtuales.
- Integrar el dispositivo háptico con el ambiente virtual.
- Evaluar la usabilidad y funcionamiento del sistema de rehabilitación.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

Existen diversos detonantes de discapacidad en México, como las enfermedades, la edad avanzada y los accidentes. En el caso del miembro superior (MS), las enfermedades ocasionan el 40.9% de las discapacidades para mover o usar sus brazos o manos, mientras que los accidentes provocan un 21.5% (15). Un ejemplo de estas enfermedades son los accidentes cerebrovasculares que provocan problemas motores y cognitivos.

1.1 Accidente cerebrovascular

El accidente cerebrovascular (ACV) se define como la pérdida de función cerebral debido a la alteración del suministro de sangre, ha sido clasificado en isquémico y hemorrágico, dependiendo de la duración de los síntomas, cuadro clínico y área vascular o anatómica del cerebro que fue afectada. El ACV por isquemia ocurre entre el 80 y el 85% de los casos, mientras que el hemorrágico ocurre del 15 al 20% de los casos (11).

En general el ACV es provocado por patologías intracraneales como aterosclerosis, donde una placa se va depositando en las paredes de las arterias provocando que el flujo de sangre, y por lo tanto de oxígeno, disminuyan; por coágulos de sangre que se desprenden de la capa interna de las arterias (émbolos) provenientes del corazón o de arterias extracraneales, o por una perfusión reducida por falla circulatoria (11). El ACV isquémico se debe a la oclusión por émbolos de vasos cerebrales importantes, mientras que el hemorrágico se debe a la rotura de aneurismas o vasos pequeños dentro del tejido cerebral (16).

En el ACV isquémico el inicio es súbito y rara vez existe dolor, algunos síntomas son la pérdida de la noción de que algo malo ocurre (anosagnosia), deficiencia sensitiva en la mitad del cuerpo (hemiparesia), parálisis total de un lado del cuerpo (hemiplejía), parálisis del movimiento ocular vertical y falta de coordinación en los movimientos (ataxia) (16,17).

1.1.1 Secuelas del ACV

Existen diversos problemas, tanto temporales o permanentes, asociados al ACV (18), los cuales pueden ser psicológicos, motores, cognitivos o la presencia de ciertas enfermedades. La existencia de estas complicaciones depende de la región afectada del sistema nervioso central (11,18) y se asocian con altas tasas de mortalidad y aumento de discapacidades (18), ya que aproximadamente dos tercios de los pacientes tienen deficiencias que no les permiten realizar sus actividades de la vida diaria con

normalidad o que dependen de otras personas para poder realizarlas, lo que a su vez afecta su participación social y disminuye la probabilidad de participar en la vida laboral (19).

Dentro de los problemas motores que se presentan después de un ACV se encuentran la pérdida de control motor, la debilidad muscular y la espasticidad que se caracteriza por reflejos exagerados, incremento de la resistencia al estiramiento y contracción muscular (20). La espasticidad, que ocurre entre un 75% y 80% de los pacientes (21), es un desorden del movimiento que provoca una disminución en el control motor de las extremidades (22); mientras que la debilidad muscular o paresia evita que los miembros puedan generar fuerza, tensión o torque para iniciar y controlar los movimientos y se presenta entre un 75% y 80% de los pacientes (20). La paresia más común es la hemiparesia, la cual solo afecta un lado del cuerpo (23).

En cuanto a los problemas cognitivos, que se presentan alrededor del 70% de los casos, podemos encontrar la disminución de las habilidades para memorizar información, prestar atención, entender instrucciones, y la capacidad para realizar funciones ejecutivas, es decir procesos cognitivos complejos que permiten la organización y planificación de la conducta, ejecución y regulación de la actividad, permite la evaluación del análisis de los resultados de las acciones (24–26). Además de los problemas cognitivos y motores se pueden presentar disfunciones sensoriales, como la pérdida del tacto o la habilidad de percibir su postura; disfunciones del lenguaje (20); y la apraxia, que es un desorden neurológico donde no existe discapacidad motora pero la persona es incapaz de recordar los pasos necesarios para realizar una tarea o movimiento (11,20).

1.1.2 Rehabilitación después de un ACV

Usualmente la rehabilitación convencional en pacientes que han sufrido un ACV se describe como un proceso de reaprendizaje motor que comienza días después del ACV (27) y que consiste en una o dos horas de terapia ocupacional y fisioterapia diaria (6). El objetivo del reaprendizaje motor es que el paciente aprenda a realizar movimientos que sean funcionales (28).

Cada paciente tiene tiempos de recuperación diferentes, la mayor parte de la mejora de la función motora se produce en el primer mes, aunque puede existir un grado de mejora adicional hasta 6 meses después (29). En general la recuperación del ACV se divide en cuatro fases (30):

- Hiperaguda: Se presenta desde los primeros síntomas hasta las primeras seis horas, se debe recibir asistencia médica y se utilizan medicamentos.
- Aguda: Va desde las primeras seis horas hasta siete días después del ACV, el paciente puede realizar movimientos pasivos, tocar objetos, sentarse en la orilla de su cama y caminar.

- Subaguda: Se presenta después de los 7 días y termina alrededor de los 3 meses. En esta fase existe una gran recuperación con poco esfuerzo.
- Crónica: es el resto de la vida del paciente, se necesita gran esfuerzo para lograr cambios.

En las tres primeras fases es importante la rehabilitación, ya que tiene un rol activo en la recuperación del paciente. Usualmente en la fase aguda predomina la rehabilitación del miembro superior (MS), sin embargo en algunos casos es menos favorable su recuperación que la del miembro inferior (31).

Existen algunos factores que influyen en el tiempo y en el progreso de la rehabilitación para que el paciente logre recuperar la función de sus miembros como son (11):

- Gravedad inicial del ACV.
- Tamaño de la lesión.
- Localización de la lesión.
- Características individuales como edad o presencia de otra enfermedad.
- Participación y constancia en la rehabilitación

Un factor clave en el éxito de la rehabilitación que influye en la participación y constancia del paciente es la motivación (22). En un estudio con sujetos sanos se observó que la consolidación o retención de una tarea motora es más efectiva si se realiza con el conocimiento de que se va a recibir una recompensa (32). Al mismo tiempo la motivación y el que tanto se involucre el paciente en su rehabilitación son piezas claves que influyen en la neuroplasticidad (33).

Como se mencionó anteriormente la discapacidad del miembro superior puede ser provocada por accidentes, y una consecuencia de estos pueden ser las fracturas, que, si bien causan discapacidad temporal, afectan la calidad de vida del paciente.

1.2 Fracturas

Una fractura es la interrupción de la continuidad ósea y/o cartilaginosa. Son causadas principalmente por traumatismos con una intensidad superior a la que el hueso soporta en caso de huesos sanos, y en huesos patológicamente alterados son ocasionados por traumatismos de poca intensidad (34).

Las fracturas se pueden clasificar dependiendo de sus características en (35):

- Cerradas o expuestas: Dependiendo de si existe o no comunicación con el exterior y por lo tanto si se encuentra o no contaminada.
- Con o sin desplazamiento.

- Articulares o extraarticulares.
- Transversales, oblicuas o espiroideas: que depende de la dirección del trazo de la fractura.
- Fracturas con dos fragmentos y un tercer fragmento” en mariposa”, multifragmentarias.

Una fractura puede ser causada por diversas razones como violencia directa o indirecta; por causa de una patología que ocasiona una debilidad del hueso (fracturas patológicas); o por estrés ocasionado por la repetición de un movimiento (fracturas por fatiga) (36). Dependiendo de la causa, las fracturas pueden presentarse de manera aislada o junto con otros traumatismos (politraumatismos) (35).

Dentro de los síntomas que se presentan en las fracturas son: el dolor constante y que se acentúa con el movimiento; impotencia funcional, aunque depende del tipo de fractura; la presencia de un tumor, inflamación y hematoma en la zona del traumatismo; deformaciones (35,36).

1.2.1 Complicaciones de las fracturas

Dependiendo de la gravedad y características de la fractura, ésta puede llegar a ocasionar problemas graves, temporales e incluso puede provocar una discapacidad (8).

En el caso de las fracturas aisladas se puede presentar una embolia grasa, que consiste en la penetración de gotas de grasa en el torrente sanguíneo, que pueden llegar a los pulmones y provocar una embolia pulmonar; mientras que en el caso de los politraumatismos puede ocasionar un shock originado por una hemorragia externa (35).

La fractura puede ocasionar complicaciones locales inmediatas mediante el daño de otras estructuras vecinas, lo que puede provocar la disminución de la funcionalidad del miembro afectado ya que se puede presentar la disminución de la fuerza, del rango de movimiento y la disminución en el control motor (37).

Existen complicaciones tardías que pueden ser provocadas por el traumatismo, como problemas vasculares, y otras que son provocadas por consecuencia del tratamiento, que incluye reposo e inmovilización prolongados. En el caso de las extremidades que usualmente utilizan férulas hasta que la fractura quede consolidada, pueden tener complicaciones una vez removido el yeso, como atrofia muscular, rigidez articular, dolor, exceso de líquido en los tejidos corporales (edema), impotencia funcional y en algunos casos se puede presentar una disminución en la plasticidad cerebral (17,35,37).

1.2.2 Rehabilitación después de la consolidación de la fractura

Si bien el periodo de máxima recuperación se encuentra entre la tercera y octava semana después de la fractura (37) la rehabilitación comenzará cuando las estructuras afectadas se estabilicen y la fractura se consolide, lo que depende de las características y la gravedad de la fractura (37).

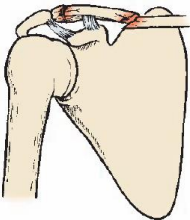


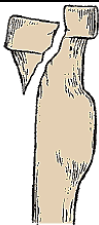

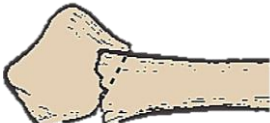
El objetivo de la rehabilitación es recuperar la función del miembro mediante la reducción del dolor, el aumento del rango de movimiento y el aumento de la fuerza muscular (38). Para lograr esta recuperación existe una gran variedad de procedimientos utilizados en la rehabilitación de fracturas como lo son el ultrasonido, la estimulación eléctrica, el uso de calor y frío terapéutico, la hidroterapia y ejercicios (38,39). Al igual que en el ACV la repetición de los movimientos, la motivación y satisfacción que provoque la rehabilitación en el paciente, se verá reflejado en su efectividad (37).

Las principales técnicas para la recuperación del movimiento son (40):

- Ejercicios pasivos, que son usados cuando el paciente no puede realizar los movimientos él mismo. El principal objetivo de estos ejercicios es mantener flexibles las articulaciones y prevenir contracturas.
- Ejercicios activos, se utilizan cuando el paciente tiene control de su extremidad y puede realizar los movimientos sin ayuda. Estos ejercicios permiten, mantener la flexibilidad y la resistencia muscular.
- Ejercicios activos-asistidos. Este tipo de ejercicios se utilizan cuando los músculos son débiles y no puede realizar todo el movimiento por su cuenta.

Para este proyecto sólo se tomarán en cuenta las fracturas más comunes que se presentan en el miembro superior (Tabla 1) y que necesitan una rehabilitación para poder recuperar la movilidad.

Tabla 1: Fracturas más comunes en el miembro superior (34).

Parte de la fractura	Causas comunes	Tratamiento	Complicaciones	Imagen
Clavícula (distintas partes)	Caídas sobre el miembro superior	Vendaje	Consolidación en mala posición	
Extremidad proximal del humero	Edad avanzada	Rehabilitación posterior a una inmovilización por vendaje	Limitación de movimiento del hombro	
Diáfisis del húmero	----- -----	Empleo de yeso	Lesión del nervio radial	
Cabeza del radio	Caídas sobre la palma de la mano	Inmovilización por férula de yeso, seguida de rehabilitación	Limitaciones en el movimiento, inestabilidad del codo	
Del radio y cúbito	Rotación del antebrazo	Operatorio y algunas veces conservador	Unión incorrecta	
Radio distal	Caídas sobre la mano	Contención con yeso, estabilización	Consolidación en mala posición	

1.3 Rehabilitación motriz

El principal objetivo de la rehabilitación motriz es mejorar las funciones que disminuyeron o que se perdieron totalmente a causa de alguna lesión o patología para que el paciente sea capaz de realizar actividades de la vida diaria (41,42), para poder lograr esto la mayoría de las terapias se centran en los principios del aprendizaje motor (25). El aprendizaje motor se refiere a los procesos que provocan cambios relativamente permanentes en la habilidad de realizar cierta tarea, gracias a la práctica y a la experiencia (43); se compone de algunos principios o variables como el uso de entornos enriquecidos, retroalimentación intrínseca y extrínseca, objetivos específicos, motivación, retos, entre otros (43,44).

Actualmente existen distintas terapias que buscan la recuperación motora en pacientes que han sufrido un ACV, como son la terapia de movimiento inducido por restricción (TMIR), electroestimulación neuromuscular, el entrenamiento con realidad virtual (RV), el entrenamiento con robots y la Facilitación Neuromuscular Propioceptiva (FNP) (20,45).

La FNP es una técnica de rehabilitación que utiliza estímulos sensoriales para facilitar el aprendizaje motor, dentro de estos estímulos encontramos estimulación táctil y la propiocepción (46). Para aplicar estos estímulos sensoriales se utilizan 10 principios básicos o fundamentales (20,46,47):

- Contacto manual: el terapeuta guía el movimiento que el usuario debe realizar además de que la presión del contacto estimula al paciente y proporciona información sobre la dirección.
- Posición corporal y biomecánica: el cuerpo del terapeuta y sus movimientos deben de estar en la posición indicada para facilitar el movimiento del paciente y poder lograr el movimiento deseado.
- Resistencia: se refiere a una fuerza externa que dificulta el movimiento permitiendo mejorar la contracción muscular y aumentando el control motor.
- Irradiación: Es un fenómeno neurofisiológico que se refiere a la propagación de la respuesta (muscular) de la estimulación.
- Estimulación verbal (comandos): uso de palabras para guiar el movimiento y/o proveer información al paciente.
- Estimulación visual: Pistas visuales pueden ayudar al paciente y corregir el movimiento o su posición.
- Tracción o aproximación: La tracción se refiere a la elongación del tronco o extremidad mientras que la aproximación se refiere a su compresión. Permiten mejorar la estabilidad y el motor control.
- Estiramientos: facilitan la actividad muscular.

- Tiempo: Se refiere a que ciertas secuencias necesitan ciertos tiempos para realizarse y poder completar cierta actividad o tarea.
- Patrones: Son patrones diagonales de MS, que pueden ser bilaterales o unilaterales y que consisten en movimientos antagonistas en la escápula (depresión-elevación), el hombro (extensión-flexión, abducción-aducción, rotación interna y externa), codo (extensión), antebrazo (pronación y supinación), muñeca (extensión-flexión, desviación ulnar y cubital) y dedos (extensión-flexión).

Por otra parte el uso de robots permite realizar un entrenamiento con mayor duración e intensidad a comparación de la terapia convencional, además de que permite medir funciones biomecánicas como rango de movimiento o torque, permitiendo llevar un seguimiento del progreso del paciente y con la ayuda de un AV este entrenamiento consiste en diferentes actividades que pueden ser ejecutadas en poco tiempo y con variaciones (3,4).

1.3.1 Ambientes virtuales en la rehabilitación

Para que la rehabilitación sea interesante para el paciente y se puedan observar mejores resultados se han integrado nuevas tecnologías como la RV. Estas herramientas presentan diversas ventajas, como que permiten ayudar a la ejecución de los ejercicios, al mismo tiempo que permiten la administración y almacenamiento de la información del proceso de rehabilitación del paciente (41).

También gracias a las computadoras se han desarrollado ambientes virtuales para rehabilitación. Un AV se refiere a escenarios gráficos en donde las personas pueden interactuar con objetos virtuales similares a los del mundo real (41,48). Por otra parte la RV se define como el uso de simulaciones o modelos computacionales que permiten la interacción del usuario con un entorno y objetos artificiales de tres dimensiones, estos modelos consisten en ambientes que simulan la realidad mediante dispositivos que permiten cierto grado de interacción mediante el envío y la recepción de información (4).

La RV se puede clasificar en tres tipos dependiendo del grado de inmersión o de presencia que los dispositivos de despliegue proveen (4,49). La presencia se puede definir como la sensación o la experiencia subjetiva de encontrarse dentro del AV, mientras que la inmersión se define como un conjunto de características cuantificables (interacción en tiempo real, retroalimentación visual, auditiva o háptica), que describe la capacidad de un sistema de mostrar un AV lo más parecido a la experiencia real (4,48). Las tres clasificaciones son (4,49):

- RV de escritorio. Carece de grado de inmersión, es la más común y menos costosa ya que utiliza un monitor de escritorio, puede incluir otros componentes como una interfaz háptica.

- Sistemas de RV proyectivos. Su objetivo es transmitir al usuario una sensación de estar inmerso en el AV mediante un campo de despliegue mayor que la de escritorio.
- RV totalmente inmersiva. Consiste en el uso de lentes de realidad virtual, el sujeto está totalmente aislado del mundo real y está completamente inmerso en el mundo virtual.

Dentro de las ventajas que aporta la RV se encuentran la recolección y almacenamiento de datos (50), la capacidad para adaptar el ambiente virtual y los ejercicios al paciente, la capacidad de aumentar la dificultad de los ejercicios conforme el progreso del paciente (51), la capacidad de repetición de las tareas (22), la participación de los pacientes desde sus hogares con la retroalimentación de los terapeutas (52) y la capacidad de integrar actividades cognitivas mediante tareas relacionadas con la memoria y atención complementando a las actividades motoras (25).

Sin embargo, durante el uso de ambientes virtuales en rehabilitación se han observado algunas desventajas, principalmente con el uso de juegos comerciales que no son diseñados especialmente para rehabilitación. En (10) se observó que la retroalimentación de los juegos Wii no es la adecuada para los pacientes, ya que estos no tienen la habilidad motora que se requiere y el videojuego no refleja el esfuerzo de estos causándoles molestia. Por otra parte, para el terapeuta la principal barrera de adopción de éstas tecnologías radica en la dificultad de adaptación y de aprendizaje a esta tecnología (53).

Específicamente en la rehabilitación en personas que han sufrido un ACV, la RV permite la repetición de ejercicios orientados al entrenamiento del miembro afectado (6), permitiendo un reaprendizaje funcional e induciendo a la neuroplasticidad, lo que permite que el sistema nervioso central se adapte a las neuronas motoras que fueron afectadas por el ACV, sin embargo, asociado al AV tiene que ir integrado un dispositivo que sea capaz de reconocer el movimiento del usuario y retroalimentarlo, como los dispositivos hápticos, los cuales son sistemas que permiten la comunicación entre el humano y las máquinas (computadoras) mediante la sensación de manipulación de objetos (9).

Estos dispositivos permiten que el usuario reciba una retroalimentación háptica, la cual se refiere a la respuesta de un objeto después de tocarlo, puede ser táctil, de fuerza o propioceptiva. La retroalimentación táctil permite sentir la textura, temperatura y vibración, mientras que la fuerza permite sentir el peso y la inercia (54). Este tipo de retroalimentación consiste en un intercambio de información, la cual no se puede obtener por la vista o el oído, entre el humano y su entorno, permitiéndole obtener información sobre su alrededor (9).

Sin embargo, las desventajas de los dispositivos hápticos comerciales, como el Novint Falcon con retroalimentación de fuerza, es que tienen un espacio de trabajo pequeño, permitiendo solo realizar movimientos de muñeca (55).

Para disminuir el costo de dispositivos que aportan una retroalimentación táctil se ha utilizado la retroalimentación por vibración por medio de motores vibradores comerciales de bajo costo (56), y que por su pequeño tamaño se pueden integrar en dispositivos ligeros que no dificultan el movimiento del usuario ya que permiten realizar movimientos de mayor amplitud (57). El uso de la retroalimentación vibratoria mejora el nivel de inmersión dentro del escenario virtual ayudando al usuario a completar sus tareas, mediante la mejora de su desempeño (58). Por ejemplo, en (56) utilizaron diez motores vibratorios modelo No. 310-103 de la empresa Precision Microdrives™ y el precio de cada uno ronda alrededor de los \$180 pesos mexicanos.

Otra ventaja de utilizar estos motores es que proporcionan señales vibratorias que se pueden modular en frecuencia y amplitud proporcionando una variación de los estímulos que los usuarios pueden distinguir (59–61); por estas ventajas la retroalimentación háptica por vibración se ha utilizado en la rehabilitación, ya que permite la transferencia de habilidades en movimientos del brazo o mano (62–64) y permite corregir trayectorias del usuario mediante colisiones en ambientes virtuales (65). Prewett et al. (59) realizó un metaanálisis en 45 estudios para determinar las condiciones bajo las cuales la retroalimentación por vibración es más efectiva para mejorar el desempeño de la tarea. Descubrieron que la retroalimentación vibratoria era más efectiva cuando proporcionaba información redundante, complementando otra modalidad como la visión, en lugar de reemplazar totalmente la retroalimentación con otra modalidad.

1.3.2 Aprendizaje motor y neuroplasticidad

Como se mencionó anteriormente, las características y ventajas de los ambientes virtuales y de la RV permiten inducir la neuroplasticidad por medio de los principios del aprendizaje motor.

La neuroplasticidad o plasticidad cerebral es la capacidad de alteración de las vías nerviosas y sus sinapsis en respuesta a una lesión, esta alteración permite la formación de nuevas sinapsis y la eliminación o modificación de las existentes para lograr un aprendizaje exitoso (50,66). Para lograr esta alteración es necesario el aprendizaje y la práctica de nuevas tareas, las cuales pueden ser presentadas mediante juegos que simulen actividades de la vida diaria (10,43).

Por otra parte, los principios del aprendizaje motor y su relación con la realidad virtual son:

- **Práctica.** Este principio permite que se observen cambios en el paciente mediante el aprendizaje motor y la neuroplasticidad, sin embargo, es importante que exista una práctica abundante e intensiva. Los ambientes virtuales permiten que los usuarios puedan disfrutar la repetición de las tareas sin que éstas parezcan tediosas, motivándolos a continuar con la rehabilitación (43). También estas tareas deben de ser parecidas a las actividades de la vida diaria del paciente. Otro factor importante es que la tarea a realizar debe de estar acorde a la capacidad del paciente, para evitar frustración, aburrimiento o fatiga (66,67).
- **Adaptabilidad.** Como se mencionó anteriormente, el ambiente virtual se debe adaptar a las características del paciente, esto permite a los terapeutas ser capaces de individualizar los tratamientos a través de la manipulación de diferentes grados de dificultad para evitar que la terapia ya no produzca ningún cambio (43). Gracias a esta característica se podría evaluar la condición motora del paciente y de acuerdo con eso adaptar las tareas. Se ha observado que las terapias con capacidad de calibración o personalización de las sesiones de entrenamiento son más efectivas que la terapia convencional (66).
- **Retroalimentación.** La retroalimentación, que puede ser dada por el terapeuta o por un dispositivo técnico, ayuda a mejorar el aprendizaje motor, de ahí su importancia de utilizarlo en la rehabilitación (68). Existen diferentes tipos de retroalimentación como la intrínseca y extrínseca, la aumentada y la de información. La intrínseca, consiste en la información sensorial que resulta del movimiento realizado por la persona, puede ser propioceptiva o exteroceptiva, y que en el caso del AV se representaría con la retroalimentación aumentada ya que se refiere a aquella información suplementaria, que al igual que la intrínseca puede ser visual, auditiva o háptica, y que es suministrada por dispositivos externos (5). Estos dispositivos pueden ser pantallas, lentes de realidad virtual, bocinas, audífonos, robots o actuadores vibrotáctiles (68).

La retroalimentación también incluye información relacionada con las tareas realizadas, se puede presentar como conocimiento de resultados (CR) o como conocimiento del movimiento (CM). La retroalimentación CM se da en tiempo real conforme el usuario vaya realizando las tareas, mientras que la CR se da al momento en que se termina la tarea, ejercicio o sesión (5).

Dentro de las ventajas de utilizar retroalimentación encontramos su facilidad de ser manipulada, lo que en muchas ocasiones permite lograr una interacción más exitosa del paciente con el AV en comparación con la que tiene con el mundo real, la facilidad de utilizar los datos que se obtienen de la sesión como herramientas objetivas de evaluación y permite aumentar o mantener la motivación. (5).

La retroalimentación puede ser multimodal, es decir puede presentarse como sonido, visual o háptica simultáneamente. Este tipo de retroalimentación permite representar una situación más completa y realista, incrementando la presencia que siente el usuario (4).

- **Motivación.** La motivación es un conjunto de fuerzas que incentivan a una persona a realizar alguna acción, estas fuerzas pueden ser extrínsecas (recompensa) o intrínsecas (por curiosidad, por juego) (66). Un aspecto fundamental en la motivación para los pacientes es el uso de retroalimentación, ya que el reforzamiento positivo, que puede presentarse como un mensaje o un símbolo indicando que la tarea se realizó correctamente, estimula al usuario a continuar con las tareas (67).

En la Tabla 2 se observan los atributos del aprendizaje motor y como se pueden aplicar con los ambientes virtuales en la rehabilitación.

Tabla 2: Atributos del aprendizaje motor y su uso con la RV en la rehabilitación (43,66,67).

Aprendizaje motor	Realidad virtual
Aprendizaje por observación	Los usuarios pueden ver su propia imagen dentro del AV mediante un avatar
	La existencia de un maestro virtual dentro del AV, que dé instrucciones e imite los movimientos a realizar
Práctica	Posibilidad de repetición de los diferentes movimientos o tareas
	Las tareas y sus objetivos deben ser relevantes para el usuario
	El terapeuta debe ser capaz de adaptar las tareas en cuanto a su dificultad de acuerdo con el progreso del usuario (entornos enriquecidos)
	Las tareas, tanto cognitivas como motoras, deben de variar su dificultad
Retroalimentación	Precisa y consistente
	Debe de existir conocimiento de resultados y de movimiento
	Multimodal (visual, auditiva, háptica)
Motivación	Retroalimentación
	Puntajes del juego o de las actividades
	Tratamiento personalizado
	Esfuerzo tanto físico como cognitivo
	Los ambientes virtuales deben causar interés

1.4 Diseño de ambientes virtuales

Al momento de diseñar un AV se deben de considerar las características de los distintos canales de comunicación entre el usuario y el AV para que la retroalimentación sea percibida de la manera correcta, permitiendo al usuario tener una mayor inmersión.

Para el diseño de cualquier AV se deben de considerar las características de los distintos canales de comunicación (visual, auditivo, háptico), que existen entre el AV y el usuario, para lograr una mejor inmersión y una experiencia más realista. Estas características se presentan en la Tabla 3, donde se presenta el retraso permitido en cada canal, así como el ancho de banda.

Tabla 3: Características de los canales de comunicación de un AV (69).

Canal		Retraso en la transmisión (ms)	Ancho de banda
Visual	Monocular	20-100	20-100 Hz
	Estereoscópica	100	0.1-5 Hz
Auditivo	Sonido a 60 dB	1	20Hz-200 KHz
Háptico	Vibración (8 bits)	5	0-10 KHz
Manipulativo (EF)	Para reflejo de fuerza	10	100 Hz

Abreviaturas: dB: decibeles, ms: milisegundo, EF: Efecto Final

Como se mencionó anteriormente los ambientes virtuales utilizados en rehabilitación deben de tener características que los videojuegos comerciales no tienen, ya que éstas actividades realizadas en los ambientes permitirán restaurar una o más habilidades del paciente, por lo que en su diseño se deben considerar los siguientes aspectos (66,70):

- Conocer la condición y las necesidades de la población a la que va dirigida.
- Considerar la capacidad del paciente para elegir actividades adecuadas para que exista un avance y mantenga su interés.
- Elegir las características del juego (reglas, estímulos sensoriales, desafío, misterio y control) que se acoplen a los objetivos de la rehabilitación de acuerdo con la habilidad o habilidades que se desean mejorar (Tabla 4).

- Definición de las salidas específicas al usuario, como el puntaje y los cambios (mejoras) que haya tenido el paciente durante su rehabilitación.

Tabla 4: Características para el diseño de terapia ocupacional según la habilidad que se desea mejorar (71).

Habilidad que mejora	Características
Discriminación de formas	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de diferentes formas, texturas y tamaños. • Empezar con grandes diferencias a mínimas.
Reaprendizaje de movimientos voluntarios	<ul style="list-style-type: none"> • Tener un objetivo claro. • Permitir automonitoreo (retroalimentación). • Aumento gradual de la dificultad (dirección, precisión y velocidad de movimientos, movimientos de una articulación e ir aumentando el número de articulaciones y la precisión). • Repetibilidad.
Coordinación y destreza	<ul style="list-style-type: none"> • Ir de movimientos lentos a rápidos. • Ir de movimientos gruesos a precisos.
Aumentar rango de movimiento activo	<ul style="list-style-type: none"> • Ejercicios repetitivos y con aumento de dificultad.
Aumento de fuerza	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar velocidad o resistencia. • Aumento del número de repeticiones.
Percepción	<ul style="list-style-type: none"> • Práctica de procesamiento de información y perceptual.
Atención	<ul style="list-style-type: none"> • Percepción de pistas en el entorno. • Mantener la atención por un tiempo. • Alternar atención entre dos o más tareas.
Memoria	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la dificultad para codificar, almacenar y recuperar información.
Resolución de problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Empezar con actividades simples y específicas, hasta llegar a realizar actividades en las que necesite deducir otras actividades.

Para el diseño de éste tipo de ambientes se utilizan algunos conceptos del diseño de juegos como (66,72):

- **Juego significativo.** Se refiere a la relación entre la acción del usuario y la respuesta del sistema ante tal acción. Induce al aprendizaje motor mediante la integración inmediata del movimiento realizado al contexto del juego, ya que engloba la planeación del movimiento, la anticipación de la respuesta del sistema y la retroalimentación.
- **Objetivos.** Se deben integrar objetivos cognitivos y motores a corto o largo plazo. Los objetivos se diseñan para proveer de cierta satisfacción al usuario cuando los logra, provocando un mayor interés.
- **Recompensas y retroalimentación.** Las acciones pueden ser retroalimentadas positivamente con pistas visuales o auditivas, con CM y CR. Las recompensas deben estar relacionadas al desempeño del usuario y se deben enfocar en aumentar el compromiso y el esfuerzo del paciente.
- **Retos y dificultad.** Los ambientes deben adaptarse a los diferentes niveles de motivación, experiencia y habilidades del paciente. Esto se puede lograr mediante una calibración de los rangos de movimiento que el paciente puede realizar o la selección de diferentes niveles (fácil, medio, difícil).
- **Estructura narrativa.** Permite incrementar el interés del paciente, facilitar la comprensión de los objetivos y tener la sensación de progreso. Esto se puede lograr con tareas de diferente dificultad, diferentes ambientes y nuevos retos o tareas.

Por otra parte, se necesita un software que nos permita diseñar y programar el AV, estos softwares se conocen como entornos de desarrollo de videojuegos o motores de juego. Un motor de juego se define como una aplicación informática constituida por un conjunto de herramientas que permiten el desarrollo de un videojuego hasta su ejecutable (73). Actualmente existen diferentes softwares en el mercado, tan sólo en el 2012 existían 334 motores de videojuegos registrados en la base de datos DevMaster.net (74). A continuación, se enlistan algunos de ellos:

- **Unity.** Es un entorno de videojuegos multiplataforma desarrollado por la empresa Unity Technologies en 2004. Permite crear contenido interactivo en 3D mediante los lenguajes de programación JavaScript o C#. Unity integra un motor de renderizado, sin embargo no cuenta con todas las características que otros motores de videojuegos sí tienen, a excepción de que se tenga una licencia, la cual puede costar alrededor de 2000 dólares (73,75).
- **CryEngine.** Surgió como un demostrador de las capacidades de la tarjeta gráfica Nvidia por la compañía Crytek. Es un entorno multiplataforma que incluyen Xbox One, Xbox 360, Play Station 4 y 3, Wii U y PC (76). En el 2016 CryEngine 5 se libera al uso público de forma gratuita para el

desarrollo de videojuegos y se permite el acceso al código fuente mediante donaciones voluntarias. Sin embargo, por la fecha de liberación existe poca documentación (73).

- **Unreal Engine.** Se creó en 1998 por la empresa Epic Games (75), comenzó como un software de pago, pero desde el 2015 el motor de videojuegos se puede descargar y usar sin costo, la única condición que tiene la empresa es que si el contenido que se desarrolló genera más de 3000 dólares en un cuarto de año, el desarrollador tiene que pagar 5% por cada venta arriba de 3000 dólares a la compañía Epic Games (77). Este entorno de desarrollo contiene gran variedad de herramientas que permite crear un ambiente virtual 3D con gran parecido al mundo real, utiliza lenguaje C++ (75). Unreal Engine 4 es la última versión destacando entre otros entornos de desarrollo por la programación de lógicas de juego y el entorno gráfico de desarrollo (76).

1.5 Evaluación de un sistema

Existen diferentes formas para poder evaluar un sistema relacionado con la Interacción Humano-Computadora, dentro de estos encontramos las herramientas que evalúan la experiencia de usuario y aquellas que evalúan la usabilidad de un sistema, su diferencia radica en que esta última evalúa en la eficiencia para realizar las tareas, mientras que la primera se enfoca en la experiencia (78). Es importante reconocer que la experiencia del usuario va relacionada con la usabilidad del sistema y con la estimulación que este le proporcione (79), por lo tanto es importante evaluar ambas características.

1.5.1 Evaluación de la experiencia de usuario

La experiencia de usuarios se refiere a como interactúan los usuarios con los productos y permite la evaluación de la calidad de estas interacciones (78), las cuales dependen de tres factores, las características internas del usuario como su humor, motivación y necesidades; las características de sistema a evaluar como su complejidad, su usabilidad y su funcionalidad; y el ambiente en el que se encuentra, es decir si tiene algún significado para el usuario o no (80).

Existen herramientas que permiten evaluar la primera impresión del usuario (AttrakDiff) y aquellas que evalúan la experiencia a largo plazo (UX Curve) y se utiliza en aplicaciones como Facebook (78). El cuestionario AttrakDiff permite evaluar las cualidades pragmáticas, las cualidades hedónicas y qué tan atractivo es un producto mediante el diferencial semántico con adjetivos opuestos (78). Esta herramienta ha sido útil al evaluar productos no físicos como los ambientes virtuales, En general el cuestionario contiene 28 pares de palabras con una escala de siete puntos, siendo -3 el menor valor, 0 el valor medio y 3 el valor más alto (81).

Las cualidades pragmáticas son aquellas que describen la usabilidad del sistema, como eficiencia y efectividad, mientras que las hedónicas son aquellas que describen la calidad del sistema y si cumplen

con las necesidades psicológicas del usuario, por ejemplo, originalidad o estética. El cuestionario mide indirectamente que tan atractivo es el sistema para el usuario, mediante las cualidades hedónicas y pragmáticas (78,82).

1.5.2 Evaluación de la usabilidad

Existen diferentes herramientas para evaluar la usabilidad de un sistema sin embargo la Escala de Usabilidad de un Sistema (SUS por sus siglas en inglés) destaca porque permite evaluar la usabilidad de una manera sencilla tanto para el usuario como para el evaluador, además que se puede utilizar en una gran variedad de sistemas desde las interfaces de computadora tradicionales, hasta sistemas con respuesta de voz interactiva. Otra de sus ventajas sobre otras herramientas de evaluación de usabilidad es que se obtiene una escala fácil de interpretar (81,83).

El cuestionario cuenta con una escala de cinco puntos para cada una de las 10 preguntas de las que se compone, lo que permite obtener un puntaje en el rango de 0 a 100, donde un puntaje mayor o igual a 85 representa una usabilidad excepcional, mientras que debajo de 70 es una usabilidad inaceptable (84). Así mismo distintos autores han implementado una escala de grados representada con letras (Tabla 5) o incluso con una escala de adjetivos (85).

Tabla 5: Escala de grados con el puntaje de la escala SUS (86).

Puntaje de SUS	Grado	Rango del percentil
84.1-100	A+	96-100
80.0-84.0	A	90-95
78.9-80.7	A-	89-89
77.2-78.8	B+	80-84
74.1-77.1	B	70-79
72.6-74.0	B-	65-69
71.1-72.5	C+	60-64
65.0-71.0	C	41-59
62.7-64.9	C-	35-40
51.7-62.6	D	15-34
0.0-51.6	F	0-14

CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad existen diversos sistemas de rehabilitación del MS que utilizan RV para mantener motivado e interesado al paciente. A continuación, se mencionan algunos sistemas, la descripción de los movimientos que realizan, el dispositivo que manda la información sobre los movimientos y el diseño y características del AV que utilizan, cabe destacar que no se encontraron sistemas de rehabilitación diseñados específicamente para personas que han sufrido fracturas, por lo que en el estado del arte se mencionan sistemas para ACV o para rehabilitación de MS en general.

Actualmente un sistema de rehabilitación que se ha utilizado para la parte distal del MS en pacientes después de un ACV es el sistema RAPAE Smart Glove™, el cual consiste en un dispositivo en forma de guante hecho de silicón que sigue el movimiento y postura de la mano (Figura 1) y una aplicación (software) que contiene juegos interactivos que proporciona retroalimentación en tiempo real, permitiendo la interacción del usuario con la aplicación (87,88).



Figura 1: Componentes del sistema de rehabilitación Rapael. Tomado de (89).

La aplicación consiste en juegos de entrenamiento categorizados en donde el usuario tiene que manipular manos y objetos virtuales. Los juegos simulan actividades de la vida diaria para mantener la motivación y repetir los movimientos en el día a día como pescar, atrapar pelotas, exprimir naranjas o cocinar (Figura 2) (88); por otra parte, los juegos, están categorizados dependiendo de los movimientos que se realicen (88).



Figura 2: Juegos de entrenamiento del sistema de rehabilitación Rapael. Modificado de (89).

Al igual que Rapael los dispositivos CyberGlove© y CyberGrasp© utilizan ambientes virtuales para dar una sensación de inmersión en el paciente cuando realiza movimientos de la mano y muñeca. En (13) utilizaron estos dispositivos junto a tres juegos. El primero, Plasma Pong©, fue adoptado de un juego existente cambiando la forma de controlarlo, de un mouse al CyberGlove©, en este juego la raqueta se movía verticalmente mediante los movimientos de los hombros (flexión/extensión). El segundo, The Hummingbird Hunt, consiste en mover un colibrí a través de un ambiente lleno de árboles, flores y un río, el paciente mueve el colibrí atrapándolo y soltándolo, esta simulación permitía la rehabilitación del movimiento del brazo y el agarre de la mano; y por último en el tercer ambiente, el paciente tiene que agarrar unos cilindros de madera y colocarlos en el suelo, mediante la extensión y flexión de los dedos (Figura 3).

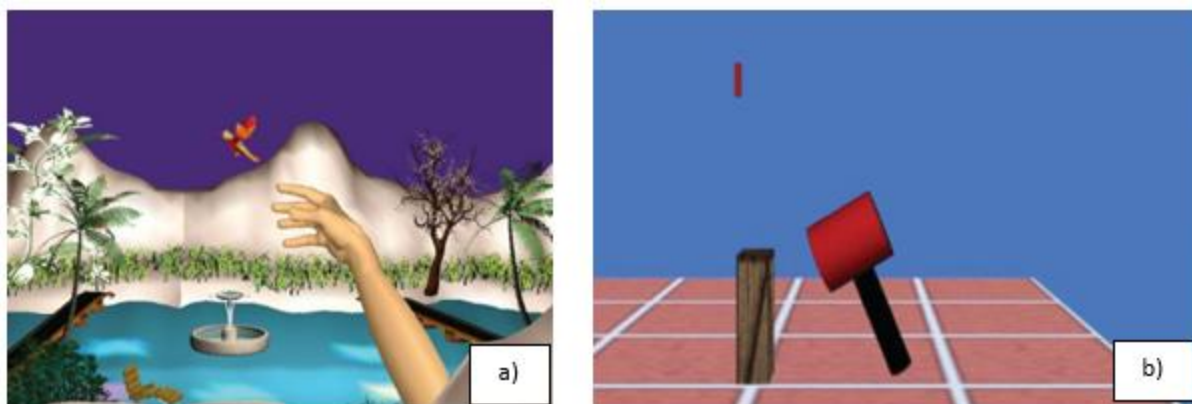


Figura 3: Juegos a) “The Hummingbird Hunt” y b) “The hammer task”. Tomado de (13).

En el área de rehabilitación también se han utilizado otros sistemas como exoesqueletos o sistemas de seguimiento de movimiento con Unidades de Medición Inercial (IMU por sus siglas en inglés). Por

ejemplo en (7) utilizaron seis IMU colocadas en el brazo del paciente. Los movimientos que realizaba el paciente se reflejaban en las escenas de entrenamiento en tiempo real, las cuales se diseñaron en el software Unity 3D. Se realizaron 3 tipos de escenarios: escenas en 2D para la rehabilitación del codo mediante la pronación/supinación y flexión de éste, escenas en 2D para la rehabilitación de hombro mediante su extensión/flexión y abducción, y por último escenas en 3D para la rehabilitación de hombro y codo. Para el primer escenario se diseñaron seis escenas que consistían en mover un ave para evitar que choque con distintos obstáculos, cada escena se diseñó para diferentes condiciones de los pacientes (desde simple a compleja), mediante diferentes dificultades y funcionalidades. En general el paciente tiene que realizar supinación y pronación del codo para mover de izquierda a derecha el pájaro y flexionarlo o extenderlo para moverlo de arriba abajo. Durante las escenas el paciente podía escuchar música para sentirse mental y físicamente relajado.

Para la rehabilitación de hombro se diseñaron ocho escenas con diferente nivel de complejidad, las cuales se desarrollan en una simulación del mar. El objetivo de estas escenas es atrapar y comerse a los peces más pequeños mediante la flexión y extensión del hombro (arriba-abajo) y la abducción y aducción del paciente (izquierda-derecha) (Figura 4).



Figura 4: AV para la rehabilitación de hombro. Tomado de (7).

Por último, las escenas para rehabilitar el hombro y el codo conjuntamente consistían en un ambiente con un avatar que simula los movimientos que el paciente realiza (Figura 5). Para llegar a estas escenas el paciente tenía que haber entrenado con las dos anteriores.



Figura 5: Escena de rehabilitación de hombro y codo. Tomado de (7).

Un ejemplo del uso de exoesqueletos para rehabilitación con ambientes virtuales es el uso de UL-EXO7 (90), el cual junto a un algoritmo de control y ocho juegos interactivos forman un sistema de rehabilitación que se ha utilizado en pacientes después de un ACV (Figura 6). El usuario puede manipular los objetos en cada juego moviendo puntos específicos o el brazo completo del exoesqueleto y éste permite una retroalimentación háptica al usuario. Este robot permite realizar abducción, aducción, flexión, extensión, rotación interna y externa del hombro; flexión y extensión del codo; pronación, supinación, flexión, extensión, desviación ulnar y radial de la muñeca. Los juegos interactivos presentes en este sistema los dividen en juegos de diagnóstico y en terapéuticos.

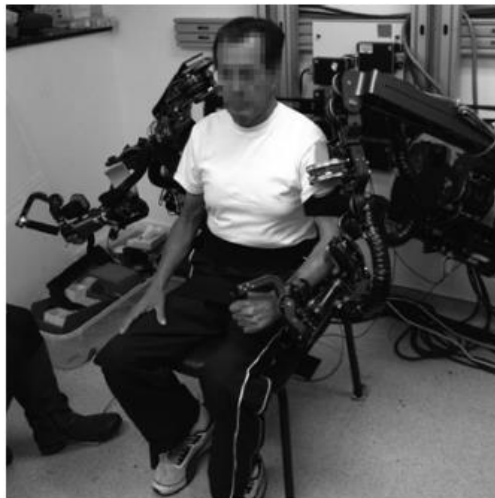


Figura 6: Paciente después de un ACV utilizando el Exoesqueleto UL-EXO7. Tomado de (90).

Así mismo se han realizado diversos estudios en pacientes que han sufrido un ACV y su rehabilitación con dispositivos hápticos comerciales como el Phantom-Omni® (Figura 7) que es un DH con

retroalimentación kinestésica, tiene seis grados de libertad¹, de las cuales solo tres cuentan con actuador, y su efector final se asemeja a un lápiz permitiendo simular instrumentos como herramientas quirúrgicas, lápices o destornilladores (41,91,92).



Figura 7: DH Phantom-Omni® de la empresa Sensable Technologies. Tomado de (92).

En la Universidad del Cauca (41) realizaron una propuesta de una herramienta de rehabilitación constituida por dos componentes, por un lado el Phantom-Omni® y el otro componente es un software. El software consiste en una base de datos y del AV donde se realizan los ejercicios de rehabilitación; por otra parte, con la interfaz háptica se realiza la comunicación entre el usuario y el software mediante la exploración de un escenario virtual y de la percepción de fuerzas de reacción con los objetos de éste.

La parte del software donde se ejecutan los ejercicios se divide en dos entornos, el primero tiene la función de familiarización del usuario con las interfaces hápticas y consiste en mover una esfera a través de un canal en 3D, cada que la esfera toque con las paredes del canal existe una retroalimentación táctil mediante el DH (Figura 8), variando la percepción de la fuerza, dependiendo del contacto entre los objetos virtuales.

¹ Un grado de libertad se refiere a uno de varios elementos que componen un sistema y que pueden exhibir movimiento de traslación o rotación independientes (123).

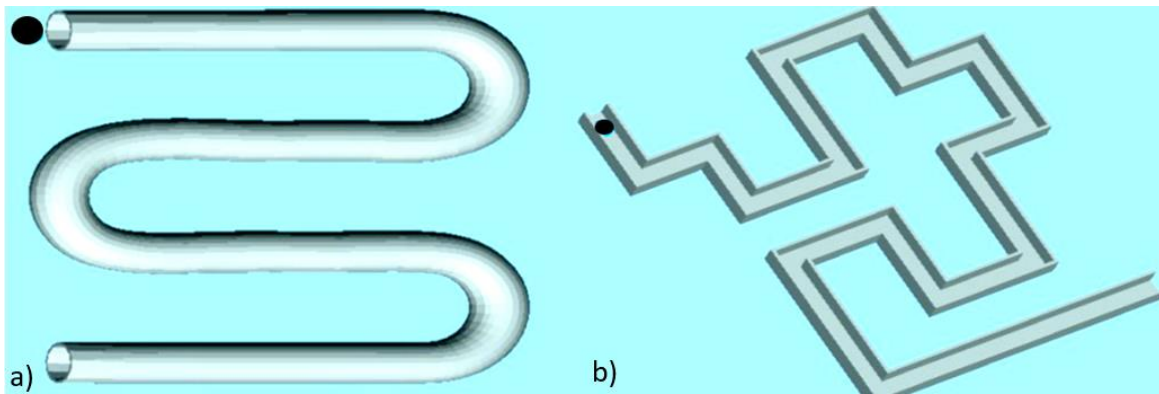


Figura 8: AV para la familiarización del paciente con interfaces hápticas. Tomado de (41).

El segundo ambiente consiste en cinco ejercicios que evalúan el desempeño del usuario, uno de estos ejercicios consiste en mover un anillo a través de una trayectoria representada por una curva, en donde el color del anillo representará que tan cerca se encuentra de la trayectoria, el color azul indica que está cerca, el naranja que se está alejando y está cerca de salirse y el rojo significa que el usuario ya se encuentra fuera de la trayectoria (Figura 9), el ambiente manda una retroalimentación al usuario que consiste en un campo de fuerza atractor que emite la curva aumentando entre más lejano se encuentre el usuario de la trayectoria.



Figura 9: AV para medir el desempeño del paciente. Modificado de (41).

Por otra parte en la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE de Ecuador diseñaron un sistema de rehabilitación con un AV utilizando el Oculus Rift, el dispositivo Leap Motion, y el Novint Falcon (93) (Figura 10). El Oculus Rift es un casco de realidad virtual, su principal objetivo es proveer experiencias en mundos inmersivos (4); el Novint Falcon es un DH comercial que cuenta con 3 grados de libertad y se conecta mediante cable USB a la computadora, permite retroalimentar al usuario mediante fuerza (55,94) ; y por último el Leap Motion es un sensor que sigue movimiento de los manos y dedos con gran precisión (95). El sistema incluye una aplicación con videojuegos basados en trayectorias con diferentes ambientes virtuales que producen una inmersión total permitiendo la evaluación de los movimientos de la mano.

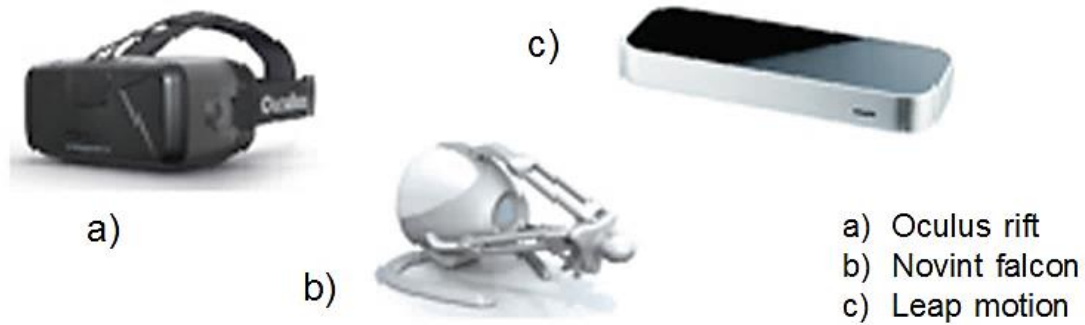


Figura 10: Oculus rift, Novint falcon y Leap motion. Modificado de (93).

En la pantalla principal de la aplicación se muestra un menú donde se puede elegir entre uno de los tres modos de juego; cada modo representa un AV distinto. El primero consiste en un juego de guitarra, donde se van generando notas, las cuales deben ser interceptadas presionando el botón correspondiente a la ubicación de éstas (Figura 11) para este ambiente se hace uso del dispositivo Leap Motion.



Figura 11: Juego de guitarra para rehabilitación de movimientos finos. Tomado de (65).

Para el segundo y el tercer AV, que consisten en un entorno urbano (ciudad) y uno natural respectivamente (Figura 12), se utilizó el Novint Falcon, en estos ambientes el paciente se mueve a través de diferentes tipos de terreno con elevaciones y depresiones para ir recolectando objetos y dependiendo de la textura de las superficies donde camine va a recibir diferentes niveles de retroalimentación de fuerza.

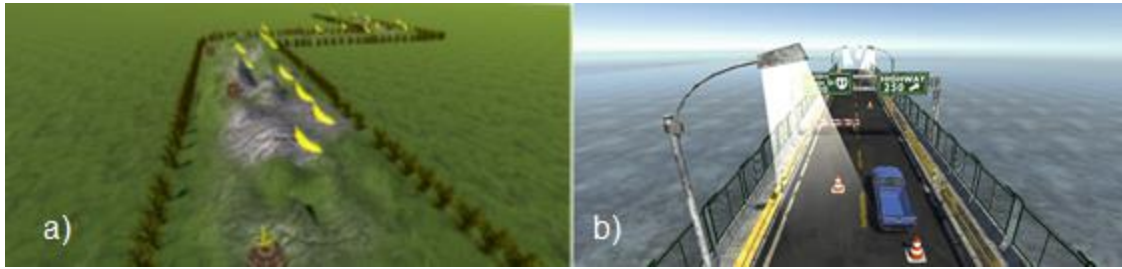


Figura 12: Ambientes virtuales a) Natural y b) Urbano) que permiten la retroalimentación háptica. Tomado de (65).

Otro sistema de rehabilitación que utiliza RV es Gloreha Aria. Es un dispositivo de terapia para la recuperación motora del MS que permite los movimientos del brazo, muñeca o dedos. Este sistema está equipado con sensores que detectan los movimientos realizados por el usuario, los cuales pueden ser desviación ulnar y radial, flexión y extensión de muñeca, pronación y supinación, flexión y extensión de los dedos y movimientos del brazo en el plano vertical y horizontal. Cuenta con un software de juegos interactivos con diferentes grados de dificultad que pueden ser programados por el terapeuta. Los juegos interactivos le permiten rehabilitar tanto la parte motora, con juegos como recoger hongos y esquivar objetos en una carretera, tanto como la parte cognitiva con juegos de atención (Figura 13) y tanto terapeutas como los pacientes tienen una retroalimentación inmediata con los puntajes del juego y pueden ser descargados en PDF o Excel (96).



Figura 13: a) y b) Juegos interactivos de Gloreha Aria para rehabilitar la parte motora. c) y d) juegos para rehabilitar la parte cognitiva. Modificado de (96).

Por otra parte también encontramos una paquete de juegos llamado *Bridge Games* (97), el cual fue desarrollado utilizando Net C# y MS SQL. Está formada por siete juegos, una lista de participantes, en la cual se puede abrir una sesión de juego ya guardada o crear una nueva y una pantalla principal en donde se mostrará los juegos disponibles que pueden ser jugados con cinco interfaces: el ratón, el teclado de la computadora, pantalla touch, Leap Motion o el Kinect. El software también incluye una base de datos que incluye datos para la identificación del usuario como nombre, fecha de nacimiento, género, tipo de patología; identificación de la sesión como la hora de inicio y fin, tipo de ejercicio, tipo de interfaz utilizada (Kinect, Leap Motion) y movimientos tanto en el eje X como en el Y. Los siete juegos del paquete consisten en interactuar con burbujas, repitiendo secuencias, completar columnas, reventarlas en cierto tiempo o recorrer trayectorias.

Así mismo existen algunas patentes de sistemas de rehabilitación que utilizan RV. Por ejemplo, en España se patentó un “Sistema de realidad Virtual para la Evaluación y Tratamiento de los Trastornos Motores Asociados a las Enfermedades Neurodegenerativas y a la Edad” (98). Este sistema permite rehabilitar tanto miembros superiores como inferiores. El sistema comprende dos módulos: el del paciente y el del experto. El primer módulo (paciente) tiene unas gafas con un acelerómetro axial, marcadores reflejantes, cámaras infrarrojas, un módulo de comunicación, medios de procesamiento que generan el escenario en una situación virtual. Por otra parte, el módulo del experto comprende unos medios de gestión que controlan los parámetros del AV, así mismo puede configurar los protocolos de evaluación y los programas terapéuticos. Los ambientes virtuales recrean la actividad y replican los movimientos que realiza el usuario.

En la Tabla 6 se presenta la comparación entre los dispositivos ya mencionados. Se puede observar que los dispositivos comerciales tienen un precio muy elevado, lo que dificultaría su adquisición en algunos centros de rehabilitación; así mismo se observa que de los nueve dispositivos, sólo dos presentan grado de inmersión, ya que los otros utilizan un monitor para presentar el AV. Todos los dispositivos presentan otros tipos de retroalimentación aparte de la visual, destacando que la mayoría de ellos presentan una retroalimentación de tipo CM para permitirle al usuario tener una mejor experiencia; en cuanto al AV destacan 3 características principales, el uso de juegos interactivos, la simulación de actividades de la vida diaria y el seguimiento de trayectorias.

Tabla 6: Características importantes de los sistemas de rehabilitación de MS.

Dispositivo/ estudio	Dispositivos que utiliza	Entorno de desarrollo	Tipo de retroali- mentación	Grado de inmersión	Partes que rehabilita	Actividades del AV	Costo (dólares)	Tipo
(88)	Guante de silicón Rapael	-----	Acústica CM	No inmersiva	Mano	Actividades de la vida diaria	\$2999.00 (99)	Comercial
(13)	CyberGlove CyberGrasp	-----	Háptica CM	No inmersiva	Mano	Juegos interactivos	\$9700 (100)	Comercial
(7)	IMU (6)	Unity 3D (gratis)	CM	No inmersiva	Codo y hombro	Juegos interactivos	-----	Sólo diseño
(90)	Exoesqueleto UL-EXO7	Microsoft Robotic Developer Studio 2008 (gratis)	Háptica Acústica CM	No inmersiva	Hombro, codo y muñeca	Juegos interactivos (diagnóstico y terapéuticos)	-----	Solo diseño
(41)	Phantom-Omni	Visual estudio 2008 (gratis) + QtCreator (open source y comercial)	Háptica CM	No inmersiva	Motricidad fina, coordinación ojo-mano, mano, integración visomotora.	Seguimiento de trayectorias y juego rítmico.	\$1000.00 (101)	Sólo diseño
(96)	Gloreha ARIA	-----	CM CR	No inmersiva	Mano, muñeca y antebrazo	Juegos interactivos y actividades de la vida diaria	-----	Comercial
(49)	Oculus Rift Novint Falcon Leap Motion	Unity 3D	Háptica	Inmersiva	Dedos y muñeca	Seguimiento de trayectorias	Oculus: \$499.99 (102) Novint: \$200.00 Leap \$87.89 (103)	Diseño

Dispositivo/ estudio	Dispositivos que utiliza	Entorno de desarrollo	Tipo de retroali- mentación	Grado de inmersión	Partes que rehabilita	Actividades del AV	Costo (dólares)	Tipo
(97)	A elegir entre ratón, teclado, pantalla touch, Leap Motion, Kinect.	Net C# and the MS SQL Server database	Táctil CM CR	No inmersiva	Control motor, aprendizaje motor y velocidad en el movimiento, actividades cognitivas	Juegos interactivos y seguimiento de trayectorias	-----	Diseño y pruebas
(98)	Gafas con acelerómetro axial, marcadores reflejantes, cámaras infrarrojas.	-----	----- ----	Inmersiva	Miembro superior e inferior	-----	-----	Patente

Abreviaturas: CM Conocimiento de Movimiento, IMU Unidad de Medición Inercial, CR Conocimiento de Resultados

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL SISTEMA

El sistema de rehabilitación se desarrolló de tal manera que sea capaz de cumplir con los requisitos para ser aceptado por el Comité de Ética en Investigación para realizar un estudio experimental en el área clínica con pacientes, para más detalles ver la Sección de Implicaciones Éticas en la página 122.

Este sistema está compuesto de la interfaz háptica y del AV, el cual se diseñó y programó como parte de este trabajo de tesis, mientras que la interfaz háptica solo se integró con el AV, ya que su desarrollo y programación se realizó por el Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx.

El desarrollo general de este sistema se dividió en cuatro etapas, la primera consistió en la obtención de información necesaria para definir los ejercicios cinesioterapéuticos que los pacientes pueden realizar con el sistema, así como los parámetros de la caracterización de su desempeño; la segunda fue el diseño del AV, seguido del acoplamiento del AV a la interfaz háptica y finalmente se realizó la evaluación del funcionamiento y de la usabilidad del sistema de rehabilitación (Figura 14).

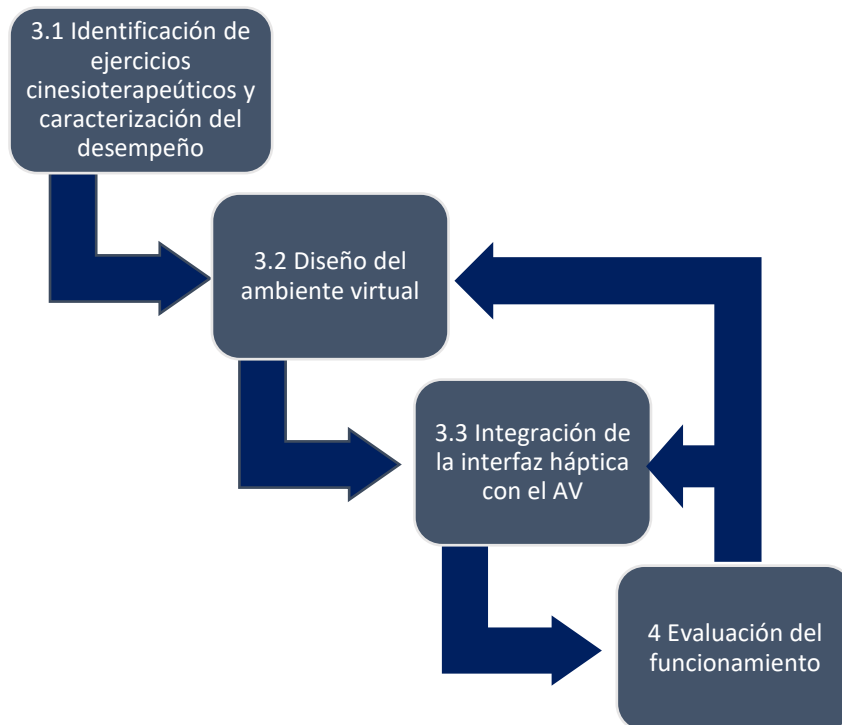


Figura 14: Metodología para el desarrollo del sistema de rehabilitación de MS.

3.1 Identificación de ejercicios terapéuticos y caracterización del desempeño del paciente.

En esta primera etapa se obtuvo información que nos permitió conocer las características de las sesiones de terapia que se les da a los pacientes que han sufrido un ACV. Para obtener esta información se aplicaron 16 encuestas a personal especializado (terapeutas físicos) que han trabajado con pacientes que sufrieron un ACV. Diez de las encuestas se realizaron en el Clínica Multidisciplinaria de Salud (antes CICMED) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx), mientras que las seis restantes se aplicaron en el Centro Estatal de Rehabilitación y Educación Especial (CEREE). Se realizaron este número de encuestas porque eran los terapeutas disponibles en los centros de rehabilitación, además que sus respuestas no presentaban una diferencia relevante, por lo que no era necesario aplicar un mayor número de encuestas.

La encuesta (Anexo 1) se dividió en dos secciones, la primera permite conocer la experiencia de los terapeutas y las características generales de las terapias como los ejercicios que se realizan y la duración de estas. La segunda sección es para conocer la experiencia de los terapeutas con el uso de Ambientes Virtuales en rehabilitación.

Dentro de los resultados obtenidos se observó que todos los terapeutas han tenido experiencia con pacientes que sufrieron un ACV y la mitad de ellos han trabajado con más de diez pacientes con esta condición. Nueve de los terapeutas respondieron que todos los pacientes que han tratado presentan problemas en el MS, mientras que solo un terapeuta comentó que menos de la mitad de sus pacientes presentaban problemas en esta parte del cuerpo (Figura 15).

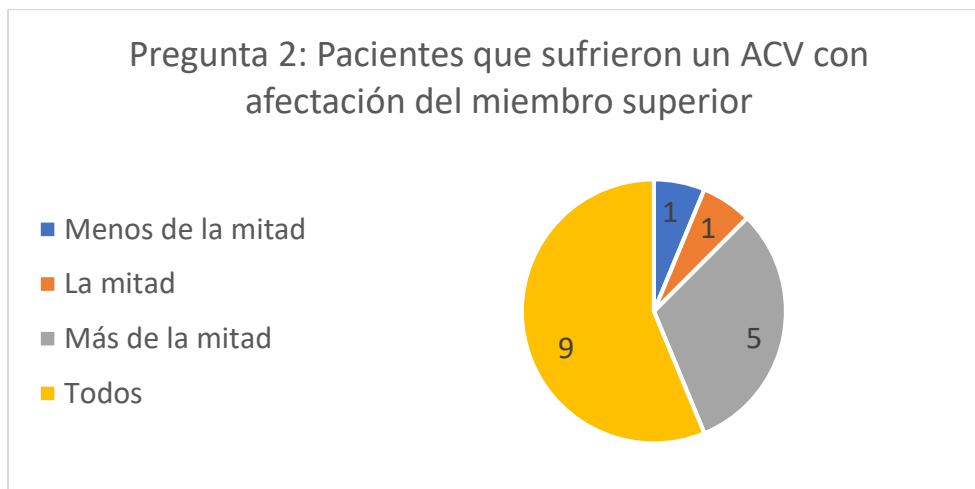


Figura 15: Número de pacientes que al sufrir un ACV se ve afectado su miembro superior.

En cuanto al rango de edad en el que se encontraban los pacientes, la mayoría (11 terapeutas) contestó que sus pacientes se encontraban en una edad entre 26 y 60 años, es decir en la etapa adulta (Figura 16).

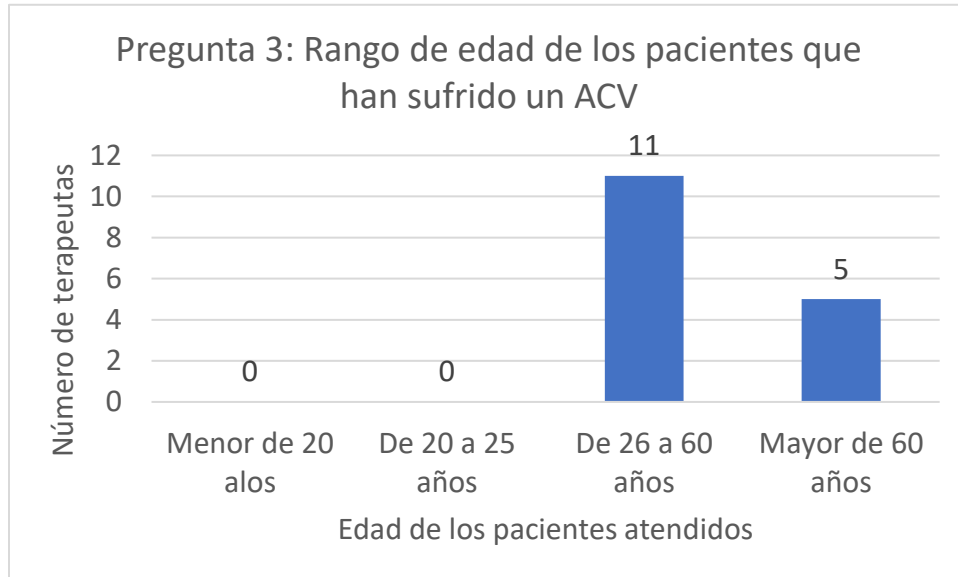


Figura 16: Rango de edad de los pacientes con ACV tratados por los terapeutas encuestados.

Con relación a la duración de una sesión de terapia física, la mayoría contestó que se tenía una duración de 60 minutos, sin embargo, comentaron que la duración de la terapia va a depender de la institución donde se esté realizando la terapia, ya que en el CEREE cada terapia se agenda para una duración de una hora, mientras que en el CIMED se agenda para 45 minutos (Figura 17). Así mismo el número de sesiones dependía de las condiciones del paciente y de su progreso en el transcurso de las terapias, por lo tanto, no se tiene un número definido, aunque tres terapeutas dieron un aproximado de 20 a 29 sesiones y 3 terapeutas mencionaron que generalmente los pacientes asisten a 30 o hasta 50 sesiones.

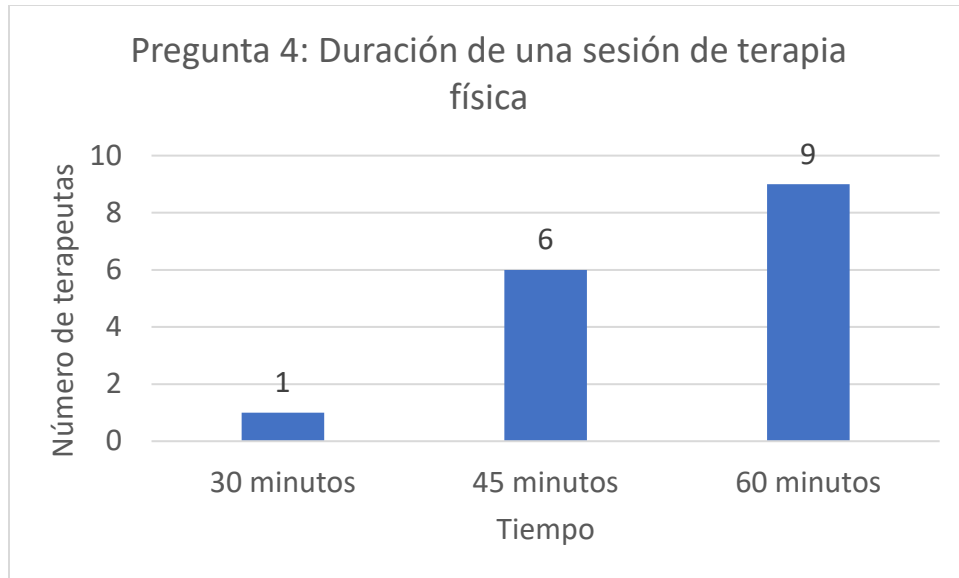


Figura 17: Duración de una sesión promedio de terapia física.

3.1.1 Identificación de ejercicios terapéuticos

Para poder identificar los ejercicios de terapia física para miembro superior y las articulaciones implicadas en éstos, se planteó la siguiente situación hipotética: paciente con hemiparesia a causa de un ACV, capaz de realizar rehabilitación activa del miembro superior.

En cuanto a los ejercicios que se realizan en una terapia los terapeutas coinciden en que deben ser los siguientes:

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Hombro <ul style="list-style-type: none"> ○ Flexión ○ Extensión ○ Abducción ○ Aducción ○ Rotaciones | <ul style="list-style-type: none"> • Codo <ul style="list-style-type: none"> ○ Flexión ○ Extensión ○ Pronación ○ Supinación | <ul style="list-style-type: none"> • Muñeca <ul style="list-style-type: none"> ○ Flexión ○ Extensión ○ Desviación ulnar ○ Desviación radial ○ Supinación ○ Pronación |
|---|---|--|

Mientras que para la posición correcta en que deben realizar estos ejercicios mencionan que se pueden realizar en tres posiciones **bipedestación** (parado), **sedestación** (sentado) o **acostado**, siempre y cuando la espalda se encuentre recta y los ejercicios no rebasen el tope anatómico.

3.1.2 Caracterización del desempeño de los usuarios

De acuerdo con las encuestas realizadas se determinaron los parámetros que nos indicarán en qué momento el usuario puede subir de nivel, es decir en qué momento se deben aumentar la dificultad de los ejercicios. En cuanto a las variables para evaluar este progreso, los terapeutas contestaron de dos maneras diferentes, unos comentaron las escalas clínicas que ocupaban para esto y otros algunas variables.

- Escalas clínicas
 - Brunnstrom: etapas de la recuperación
 - Daniels: Fuerza muscular.
 - Ashworth: mide el nivel de espasticidad
 - Campbell: Escala del tono muscular
- Variables
 - Arcos de movimiento
 - Fuerza muscular
 - Dolor y sensibilidad
 - Independencia
 - Resistencia

Estas variables les permiten saber cuándo es el momento indicado para poder aumentar la dificultad de los ejercicios, por ejemplo, cuando su rango de movimiento aumenta, o cuando el dolor disminuye y la fuerza aumenta. Y como comentario agregaron que algunas métricas que podían ser útiles para la evaluación del desempeño del paciente son el tiempo que tarda en realizar los ejercicios y la precisión con que lo realiza.

De las variables que comentaron los terapeutas se descartaron la fuerza muscular y la resistencia, ya que son parámetros que no pueden ser cuantificados por el sistema o alguna de las escalas clínicas.

En este cuestionario también se les preguntó sobre su relación con el uso de ambientes virtuales en su trabajo. De los 16 encuestados, nueve de ellos han utilizado la computadora como apoyo en las terapias, sin embargo, de estos nueve solo seis han utilizado videojuegos para mejorar la movilidad del paciente. Dentro de las características de los videojuegos que han utilizado se encuentran el uso de estímulos visuales y auditivos, así como la opción de seleccionar diferentes

niveles de dificultad según la condición del paciente. Cabe destacar que ningún terapeuta ha utilizado algún DH como apoyo en la terapia.

Por lo tanto, para el diseño de los escenarios virtuales se tomarán en cuenta los movimientos que pueden realizar los pacientes, así como el tiempo, la precisión, la independencia y las escalas clínicas como variables que caracterizan el desempeño del paciente, destacando que la posición del paciente para utilizar el sistema de rehabilitación será en sedestación, la cual coincide con una de las que propusieron los terapeutas.

3.2 Diseño del ambiente virtual

Para la segunda etapa del proyecto se utilizó la información recabada en las encuestas a terapeutas, así como la existente en la bibliografía. Cabe destacar que el diseño no fue un proceso lineal, ya que en algunas partes del proceso se pidió retroalimentación de los terapeutas y el ambiente virtual se modificó.

En la Figura 18 se presenta de manera general las etapas para desarrollar el sistema de rehabilitación de MS.

3.2.1 Material

Durante el proceso del desarrollo del sistema de rehabilitación se utilizaron las herramientas y dispositivos que se presentan a continuación.

Se utilizó la plataforma Unreal Engine 4 como motor de juego para el diseño de los escenarios virtuales, así como para su programación. Se eligió esta plataforma sobre las otras por su programación en bloques, “Blueprints”, que facilita programación del AV, además este motor de juego es gratuito, permitiendo que exista mucha documentación, la información se actualice constantemente y que exista intercambio de herramientas por parte de su comunidad.

Para éste proyecto se utilizó el plugin *UDPCommunication* que permite la comunicación en tiempo real por medio del Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP por sus siglas en inglés), el plugin es una aportación de la comunidad, es gratuito y además está configurado para que se pueda integrar dentro de los ejecutables de los proyectos, se puede encontrar en el siguiente link <https://github.com/is-centre/udp-ue4-plugin-win64>.

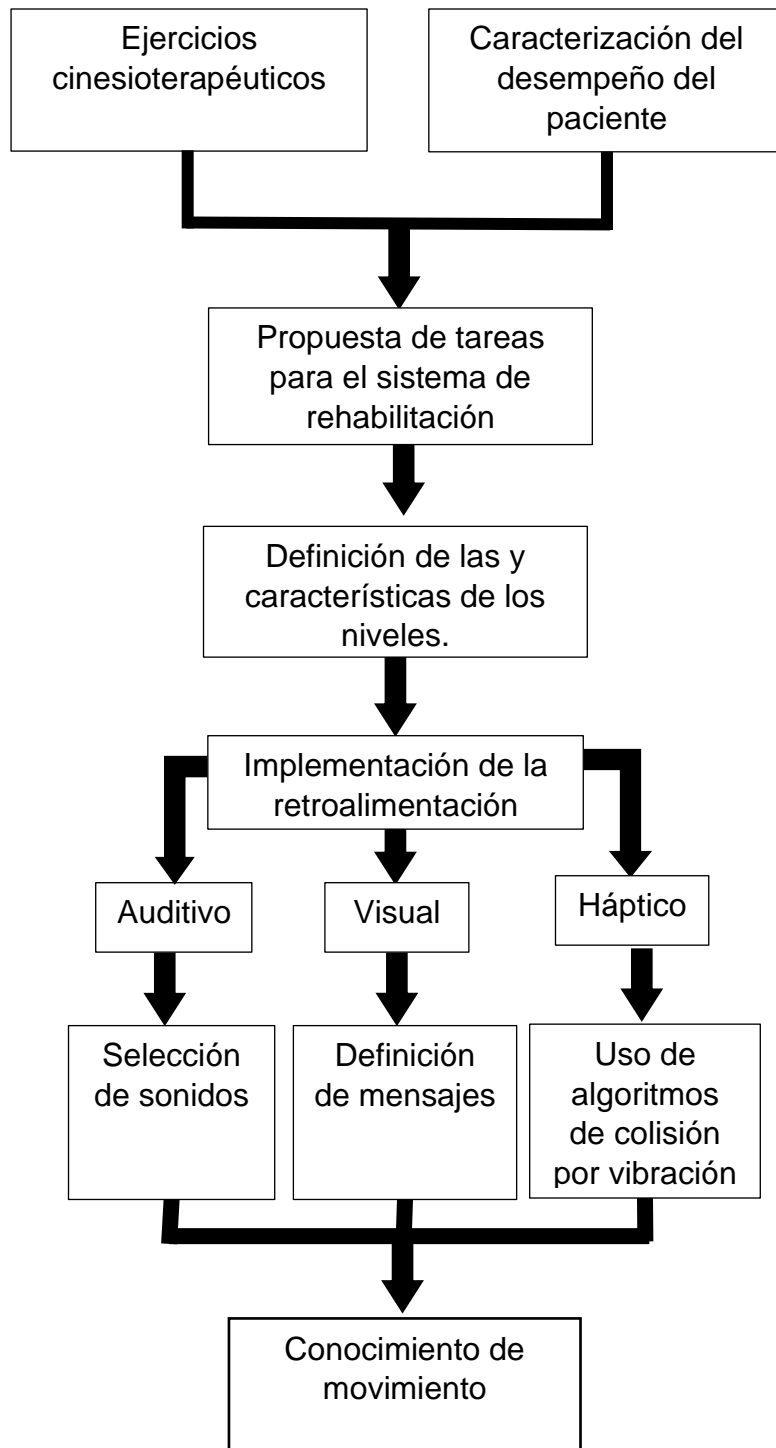


Figura 18: Diagrama del diseño de los ambientes virtuales del sistema de rehabilitación propuesto.

Para la parte física se implementó el DH descrito en la sección 3.4.1, ya que permite dar una retroalimentación háptica y obtener los movimientos que realiza el usuario con su brazo en el espacio de trabajo en los ejes X, Y, Z, para posteriormente enviarlos por comunicación UDP a otros ambientes externos.

Se utilizó una computadora portátil con una memoria RAM de 16 Gb, procesador Intel i7, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce® GTX 1060 y un disco de estado sólido de 128 Gb, para el diseño y programación del ambiente, así como dispositivo de visualización del AV para las pruebas con usuarios. El segundo dispositivo de visualización es el visor de realidad virtual (HMD por sus siglas en inglés), Vive Pro de HTC el cual se utilizó junto con una estación base para su rastreo (Figura 19).



Figura 19: Base station 2.0 y Vive Pro HMD de HTC (104,105).

3.2.2 Propuesta de tareas y definición de niveles de dificultad de los espacios virtuales

Al tener identificados los ejercicios cinesioterapéuticos que se podían realizar con el sistema de rehabilitación se propusieron diez escenarios virtuales con la descripción de los movimientos que el usuario realizaría, así como las métricas que iban a permitir observar su desempeño. Las tareas de los escenarios se basaron en actividades de la vida diaria y en tareas con actividades cognitivas.

Para la descripción de los escenarios virtuales es necesario aclarar que los movimientos que se realicen en éstos se describirán mediante ejes, en donde el eje X serán los movimientos que se realicen hacia en frente o atrás, los del eje Y los que se realicen a la derecha o izquierda y finalmente en el eje Z se reflejarán los movimientos que se realicen hacia arriba o hacia abajo (Figura 20).

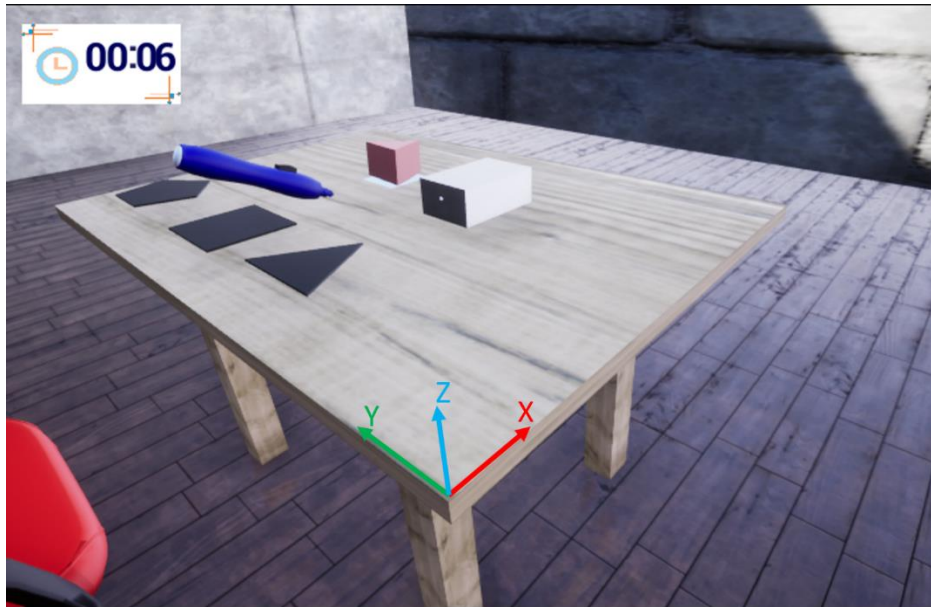


Figura 20: Representación de los movimientos en los ejes (X, Y, Z) en el escenario Figuras.

Escenario 1: Caja.

El escenario consiste en un cuarto con una mesa al centro, en esta mesa en frente del usuario se encuentra una caja a la cual se debe de llevar las diferentes figuras que aparecen en el extremo contrario de la mesa (Figura 21). Los movimientos que realiza el usuario serán en un plano de dos dimensiones (X, Y) y su dificultad se ve reflejada en el número de figuras que se presenten, es decir en cada nivel aparecerá un número mayor de figuras.

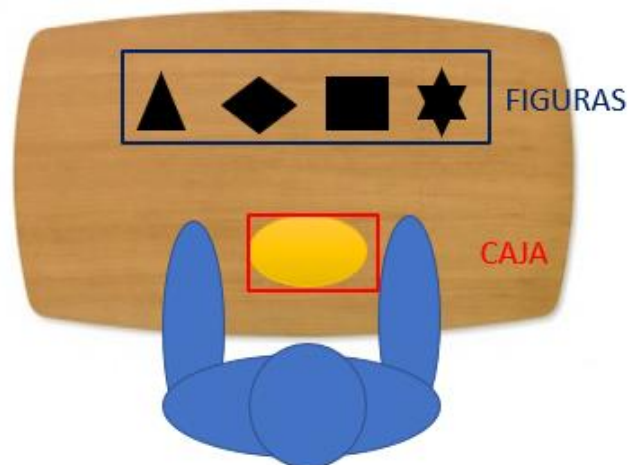






Figura 21: Concepto del primer escenario "Caja".

El desempeño del usuario se caracteriza mediante el tiempo, número de figuras insertadas en la caja y rangos de movimiento y los movimientos del MS se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Actividad del MS que realiza el usuario en el escenario "Cajas".

Inicio	Depende de la posición de la figura	Fin
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo pronado y la muñeca en posición neutral	Se extiende el hombro y el codo, el antebrazo pronado y la muñeca en posición neutral	Codo semiflexionado, antebrazo pronado, muñeca en posición neutral
	 	

Escenario 2: Figuras.

El escenario consiste en un cuarto con una mesa al centro, en esta mesa en frente del usuario, se observan cajas con diferentes formas, mientras que frente a las cajas aparece una figura, el usuario tiene que tomarla y llevarla a la caja que corresponda con la forma (Figura 22). Al igual que el primer escenario, los movimientos del usuario se realizan en un plano de dos dimensiones (X, Y).

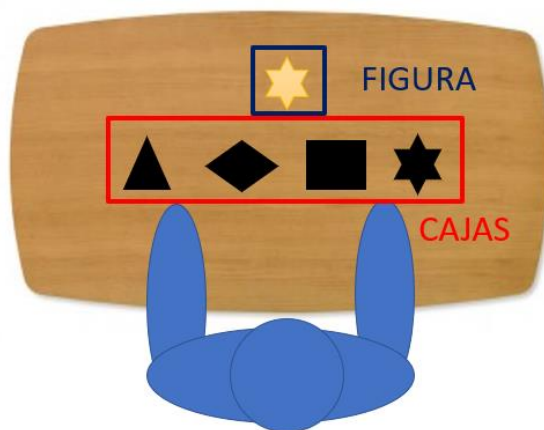

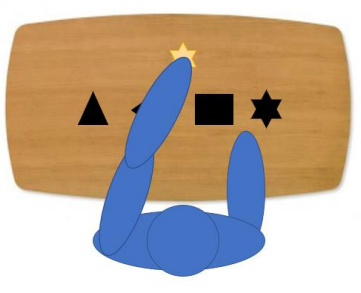
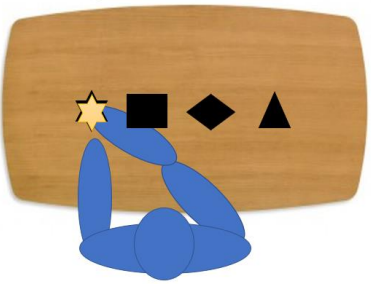


Figura 22: Concepto del escenario "Figuras".

La dificultad del juego aumenta mediante el número de cajas que se tienen, es decir en cada nivel aparece una caja más con una forma diferente y el desempeño del usuario se caracteriza mediante el tiempo, el número de aciertos y rangos de movimiento. La actividad del MS que el usuario realiza en este escenario se encuentra en la Tabla 8.

Tabla 8: Actividad del MS que realiza el usuario en el escenario "Figuras".

Inicio		Fin
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo pronado y la muñeca en posición neutral	Se extiende el hombro y el codo, el antebrazo pronado y la muñeca en posición neutral	Codo semiflexionado, antebrazo pronado, muñeca en posición neutral
		

Escenario 3: Anaqueles.




Este escenario consiste en un cuarto que simula un supermercado, en el cual existen anaqueles en los que se encuentran distintos productos. El usuario tiene que agarrar el producto que se le indique, el cual se encuentra en un estante del lado izquierdo o derecho dependiendo del lado del cuerpo que se necesite rehabilitar, después de tomarlo lo tiene que colocar en el carrito de compras (Figura 23). Los movimientos que realice el usuario se ven reflejados en un plano de tres dimensiones (X, Y, Z).



Figura 23: Concepto del escenario “Anaqueles”.

La dificultad se ve afectada por la ubicación del producto, ya que en el nivel más bajo el producto se encuentra a la altura de la mano del usuario, mientras que en los más avanzados el producto se encuentra a mayor altura, por lo que el usuario tiene que vencer la gravedad para poder tomarlo. La caracterización del desempeño está dada por el tiempo, el número de aciertos y los rangos de movimiento, la actividad del MS se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9: Actividad del MS que realiza el usuario en el escenario “Anaqueles”.

Inicio		Fin
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo y muñeca neutros	Hombro con abducción, codo extendido, antebrazo pronado y muñeca ligeramente flexionada.	Codo flexionado, antebrazo pronado, muñeca en posición neutral
		

Escenario 4: Laberinto.

El escenario, como su nombre lo indica, consiste en un laberinto, donde el usuario tiene que moverse horizontal y verticalmente (plano 2D) sin chocar con las paredes, hasta encontrar la salida del laberinto (Figura 24).

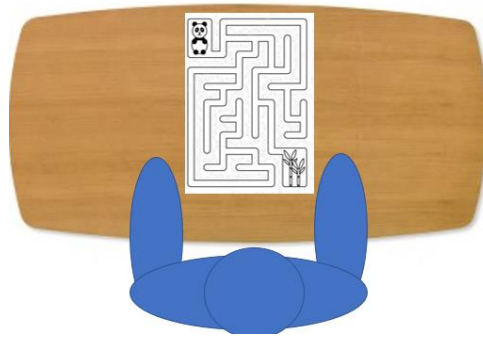



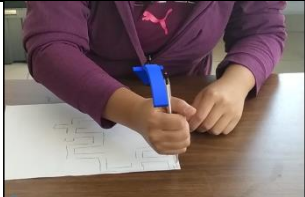



Figura 24: Concepto del escenario “Laberinto”.

La dificultad del escenario consiste en ir disminuyendo el ancho de los caminos y aumentar el tamaño total del laberinto, así como la dificultad para encontrar la salida. Para caracterizar el desempeño del usuario se toma en cuenta el tiempo de resolución, la complejidad del laberinto, la amplitud de los caminos, los rangos de movimiento y la forma del laberinto (circular, caminos en diagonal). Los movimientos que el usuario puede realizar en este escenario se encuentran descritos en la Tabla 10.

Tabla 10: Movimientos que el usuario realizará en el escenario “Laberinto”.

Inicio	Movimientos horizontales	Movimientos verticales
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo y muñeca neutros	Rotación interna, externa y abducción del hombro, pronación, extensión y flexión del codo.	Extensión y flexión del hombro y codo.
	 	 

Escenario 5: Apilar.

Para este escenario el usuario tiene que apilar cubos que aparecerán frente a él. Los cubos cambian de tamaño, disminuyéndolo conforme vaya avanzando de nivel y se agrega como reto

cognitivo el que las caras de los cubos sean de diferente color y el usuario tiene que hacer coincidir los colores al apilarlos (Figura 25).

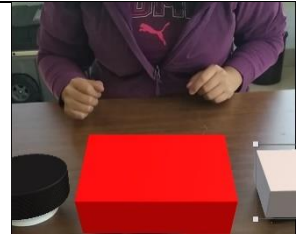




Figura 25: Concepto del escenario “Apilar”.

La dificultad cambia según el número de cubos a apilar y si tiene que apilarlos en un tiempo establecido. Su desempeño se ve reflejado en el tiempo de resolución, el número de aciertos, los rangos de movimiento y el número de bloques que logre apilar. La actividad del MS en este escenario se describe en la

Tabla 11.

Tabla 11: Actividad del MS del usuario en el escenario “Apilar”.

Inicio		Fin
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo pronado y muñeca en posición neutral	Rotación interna o externa y abducción del hombro, extensión del codo, flexión ligera de la muñeca y extensión ulnar	Flexión del codo, antebrazo y muñeca en posición neutral.
		

Escenario 6: Lanzamiento.




El escenario consiste en un espacio abierto, en donde el usuario tiene que lanzar un disco hasta la zona que se le indique, entre más arriba coloque el brazo, el disco llega más lejos (Figura 26), por lo tanto los movimientos del usuario se realizan en un plano de tres dimensiones.



Figura 26: Concepto del escenario “Lanzamiento”.

La dificultad se ve afectada por la ubicación del lugar a donde tiene que llegar el disco, el tiempo que tiene para lanzarlo y el número de aciertos. Para evaluar el desempeño el usuario se toma en cuenta el tiempo, el número de aciertos, los rangos de movimiento y la altura del brazo. La actividad del MS que realiza el usuario se encuentra descrita en la Tabla 12.

Tabla 12: Actividad del MS que el usuario realiza en el escenario “Lanzamiento”.

Inicio		Fin
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo pronado y muñeca en posición neutral	Hombro flexionado, codo flexionado, antebrazo en pronación, muñeca en posición neutral	Hombro flexionado, codo extendido, antebrazo en pronación. Muñeca con desviación ulnar y flexionada.
		

Escenario 7: Escritura.

Los movimientos que el usuario realice serán en un plano de dos dimensiones (X, Y) y el objetivo es remarcar una palabra que se presente en el escenario. La dificultad se ve afectada por los trazos para completar la letra (rectos o curvos), así como el número de letras, el tamaño de estas y la separación entre ellas. El desempeño del usuario se caracteriza por el tiempo que tarde en realizar los trazos, los rangos de movimiento y las letras completadas.

En el caso de este escenario la trayectoria depende de las letras que contenga la palabra, pero la posición inicial será el brazo pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo pronado y muñeca en posición neutral.

Escenario 8: Pintura.

En este escenario el usuario realiza movimientos en un plano de tres dimensiones (X, Y, Z) y su objetivo es pintar una pared, para lo cual primero debe tomar una brocha que se va a encontrar frente a él, pasar por el bote de pintura y finalmente colocar la brocha en el espacio a pintar. En este escenario se encuentra una mesa, sobre la cual está la brocha y el bote de pintura, y arriba de la mesa se encuentra el espacio a pintar (Figura 27).

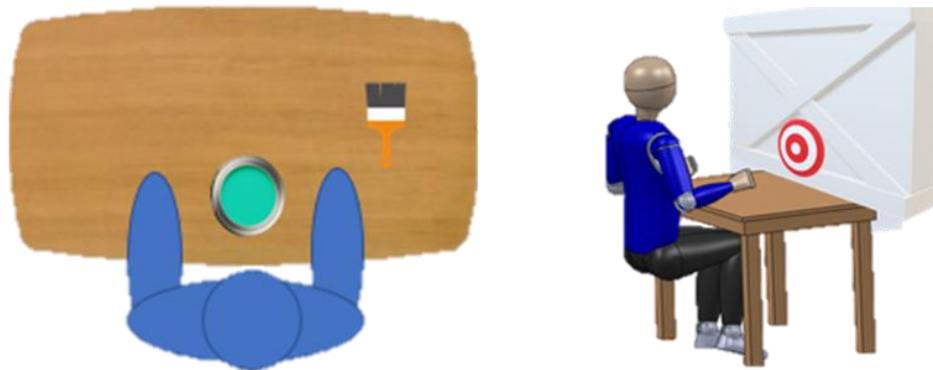


Figura 27: Concepto del escenario "Pintura".

Conforme el usuario suba de nivel, los objetos estarán más alejados y el espacio será mayor, al igual que la superficie sobre la cual tiene que pasar la brocha. Su desempeño se ve reflejado en el tiempo que tarda en pintar el espacio y el rango de movimiento. Los movimientos que el usuario tiene que realizar se encuentra en la Tabla 13.

Tabla 13: Actividad del MS que el usuario realizará en el escenario “Pintura”.

Inicio / Al ir al bote de pintura	Al agarrar la brocha	Fin
El brazo se coloca pegado al cuerpo con el codo flexionado, el antebrazo pronado y muñeca en posición neutral	Extensión del hombro, con abducción y rotación interna, extensión del codo, pronación del antebrazo y extensión de la muñeca con una ligera desviación ulnar	Hombro flexionado en aducción y rotado internamente, el codo flexionado y el antebrazo en supinación, la muñeca flexionada y con desviación ulnar.

Escenario 9: Acertijos.

Los movimientos que el usuario realiza son en un plano de tres dimensiones y el objetivo principal de este escenario es mejorar las habilidades cognitivas del paciente mediante la resolución de diferentes acertijos, que pueden ir desde una simple operación matemática a la organización de objetos. El usuario se sitúa frente a una puerta en la cual se observa el acertijo que al ser resuelto abrirá la puerta mediante movimientos de muñeca y otra puerta aparecerá. Cada puerta representa un nivel.

Escenario 10: Atrapar.

El escenario consiste en un campo, donde el usuario controla una caja para poder atrapar objetos que caen del cielo. El usuario puede realizar movimientos en el eje X, Y y Z y la dificultad se ve afectada por la velocidad con la que caen los objetos y por la trayectoria que estos siguen al caer (Figura 28). Los movimientos que el usuario realiza en este escenario son los mismos que en el escenario “Laberinto” (Tabla 10).



Figura 28: Concepto del escenario “Atrapar”.

Los escenarios antes mencionados se revisaron por parte de la L. en T.F. Gabriela López Peña, quien es la encargada del departamento de terapia física de la Clínica Multidisciplinaria de la Salud, quien comentó que los ejercicios y escenarios propuestos estaban bien para ocuparlos en terapia, y como retroalimentación los ejercicios se podían basar en las etapas de Brunnstrom y realizar alguna variación de los ejercicios.

Por otra parte, de los escenarios mencionados se descartaron o se modificaron:

- Se descartaron aquellos escenarios virtuales donde los movimientos sólo se realizaban en dos ejes (XY) para evitar confusión en el usuario ya que el monitor se coloca en el plano XZ. Los movimientos que el usuario realizaba se veían reflejados en el monitor en planos diferentes y una de las características al usar un AV en la rehabilitación es que los movimientos que se reflejan en el monitor tienen que ser lo más parecido posible a los que el usuario realiza en la realidad, por lo que los movimientos del usuario no se iban a ver perfectamente reflejados en la pantalla por el cambio de los ejes y podría causar confusión o problemas en la rehabilitación. Por esta razón se descartaron el escenario uno (Caja), el cuatro (laberinto) y el siete (escritura).
- Si bien el escenario de figuras y el de atrapar también se realizan en dos ejes, estos escenarios no se descartaron, sino se modificaron, para que su diseño fuera en un plano de tres dimensiones para que existiera mejor visualización de los objetos y de la posición del efector final.
- El escenario de lanzamiento se descartó por el tipo de movimiento que se realiza dentro de éste, ya que el usuario al querer lanzar el objeto podría hacer un esfuerzo que lo termine lastimando o que pueda dañar el DH.
- El escenario de pintura se descartó ya que los movimientos principales se realizaban en el eje Z y para realizarlos los usuarios tenían que vencer la gravedad, existiendo la posibilidad de que los usuarios no puedan realizar estos tipos de movimiento, lo que podría ser frustrante.
- Para el proyecto se decidió enfocarse solamente en la recuperación motora, por lo tanto, todos los ejercicios o retos cognitivos se eliminaron o no era la prioridad en los escenarios, por lo tanto, el escenario ocho (Acertijos) se descartó.
- En el escenario de Anaqueles los productos se colocarán de ambos lados del usuario para que realice movimientos con mayor rango.

Por lo tanto, se mantuvieron solo cuatro de los diez escenarios propuestos, el escenario dos “Figuras”, el escenario tres “Anaqueles”, el escenario cinco “Apilar” y el escenario diez “Atrapar”.

3.2.3 Escenarios virtuales en la plataforma Unreal Engine 4

Al tener el concepto de los cuatro escenarios virtuales se comenzó con la programación y diseño de estos escenarios en la plataforma Unreal Engine 4. A continuación se presenta la primera versión de los escenarios virtuales.

En el escenario “Figuras” se encontraban las cajas en frente del usuario y más adelante aparecía la figura a mover. En la parte superior de la pantalla se mostraba el número de aciertos y el tiempo en que el jugador ha estado en el juego. Así mismo, en la parte inferior derecha se encontraba un botón que mandaba al menú de inicio (Figura 29).

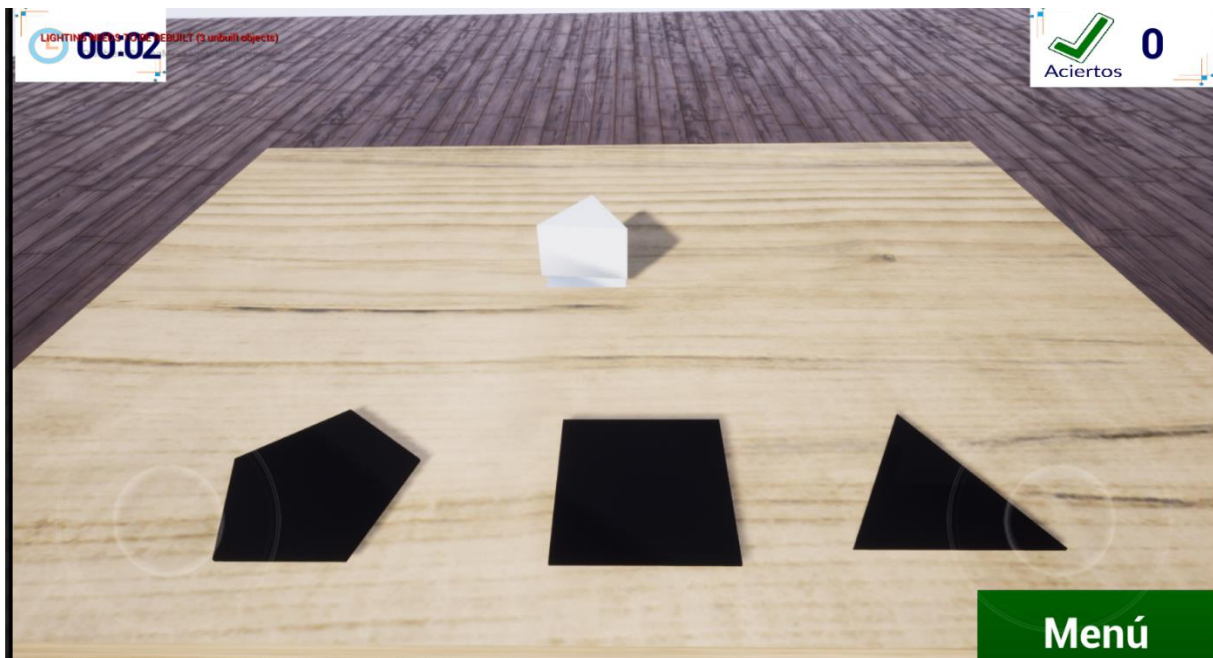


Figura 29: Primera versión del escenario virtual “Figuras”.

En el escenario virtual “Anaqueles”, se encontraban diferentes productos en repisas de madera, el EF está representado con una mano, así mismo en el escenario se encuentra el carro de compras donde se colocarán los productos y también se encuentran dos flechas que son las que permitirán mover el carro a través del pasillo. En la parte superior se encuentra un reloj y el número de aciertos, mientras que en la parte inferior se encontraba un botón para regresar al menú principal (Figura 30).



Figura 30: Primera versión del escenario virtual “Anaqueles”.

Para el escenario virtual “Atrapar” el EF se representó con una canasta que se encontraba en un campo abierto. Con la canasta se tenía que atrapar frutas que caían del cielo. Al igual que los otros escenarios en la parte superior se encontraba un reloj y le número de aciertos, mientras que en la parte inferior se encontraba el botón de menú (Figura 31).

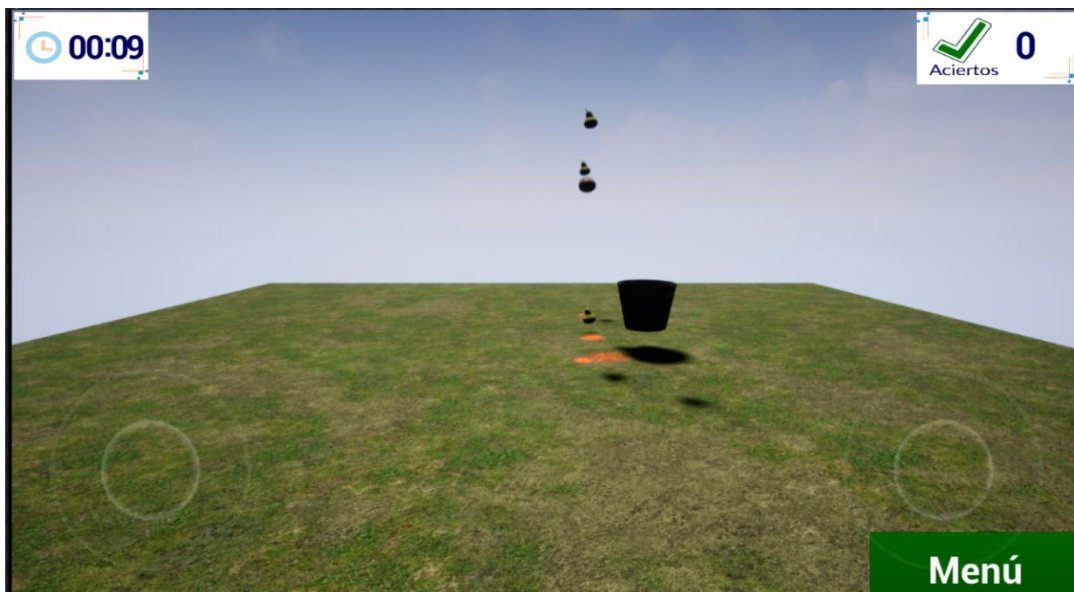


Figura 31: Primera versión del escenario “Atrapar”.

En el escenario apilar se encontraban los bloques que iba a mover el usuario, el EF se representó con un gancho que se encontraba en un campo abierto con objetos de construcción (Figura 32).

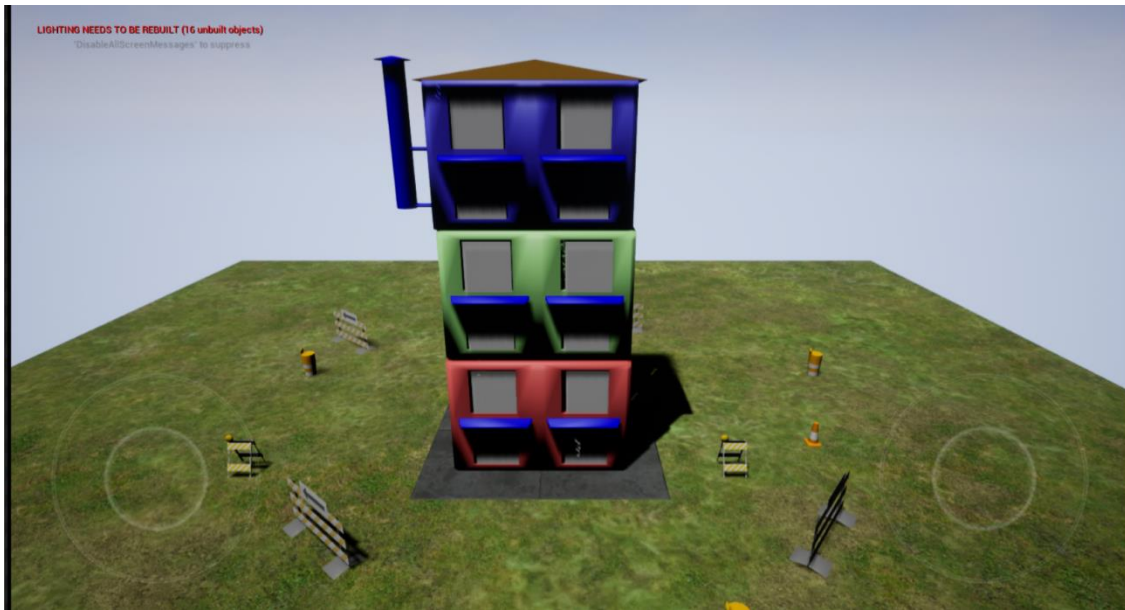


Figura 32: Primera versión del escenario virtual “Apilar”.

3.2.4 Retroalimentación

La retroalimentación del sistema se dará por tres modalidades:

- Retroalimentación visual: Si bien esta retroalimentación se puede considerar constante, ya que las terapias se desarrollarían dentro del AV, existen ejemplos concisos sobre el uso de esta modalidad de retroalimentación para ayudar al usuario. Por ejemplo, el número de aciertos que se van acumulando y el tiempo que el usuario lleva en el juego.

Así mismo en el escenario Apilar se utilizó la retroalimentación visual mediante una guía que se encuentra sobre la base, y al colisionar con el bloque cambiaba a un color rojo

- Retroalimentación háptica: este tipo de retroalimentación se llevó a cabo por vibración (mini motor) donde se implementó un pin digital configurado en modo PWM con una resolución de 12bits; su funcionamiento se describe a continuación, el AV manda un valor numérico entre 0 a 4095 al DH para que se active el motor y mande una vibración al usuario, esto sucede solo cuando el efector colisiona con algún objeto virtual dentro del escenario. Cabe mencionar, que se limitó el rango del PWM entre 0 y 3800 para limitar la corriente del motor

mediante un transistor BC548 e incrementar la vida útil del mismo. En la Figura 33 se puede observar el cambio de un valor 0 cuando el EF está en el aire a un valor de 3800 que ocurre cuando el EF toca el triángulo.

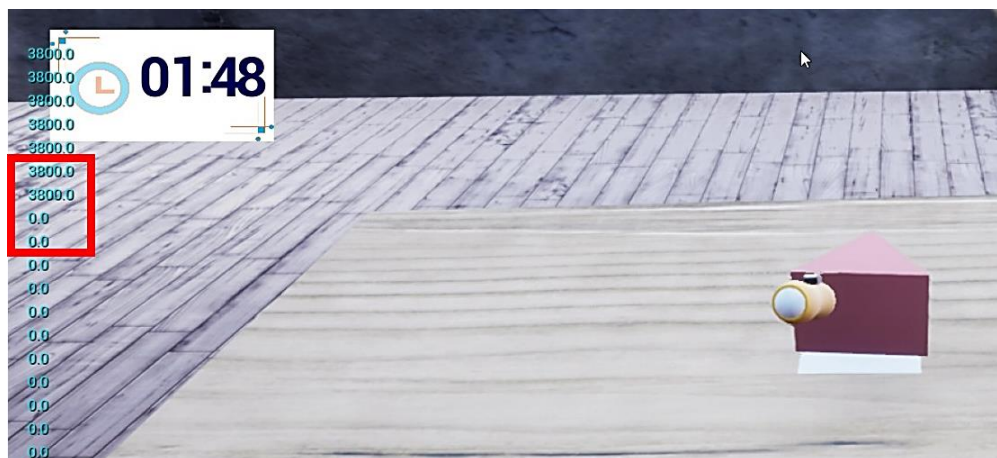


Figura 33: Ejemplo del envío de datos PWM.

- Retroalimentación auditiva: Este tipo de retroalimentación dependía de los escenarios, sin embargo, ocurría cuando se tenía un acierto. A continuación, se describe la retroalimentación en cada escenario:
 - Figuras: En este escenario existían cuatro momentos que daban este tipo de retroalimentación, el primero ocurría cuando la figura que se colocaba sobre una caja era la correcta (coincidía la forma de la caja y la figura), el segundo era cuando la forma de la caja y de la figura que se colocaba sobre la caja no coincidían, el tercero ocurría cuando se sumaba un acierto al usuario y la última ocurría cada que aparecía una nueva figura.
 - Anaqueles: En este escenario existían dos sonidos diferentes, uno cuando el usuario chocaba con algún estante y el segundo ocurría cuando el usuario sumaba un acierto.
 - Atrapar: Al igual que el escenario Anaqueles, este escenario tiene dos sonidos, uno es cuando el usuario suma un acierto, es decir cuando la fruta cae dentro de la canasta y el segundo es cuando el usuario atrapa un gusano.
 - Apilar: En este escenario solo existía la música de fondo, ya que se centró más en el uso de retroalimentación visual.

3.2.5 Diseño de interfaz de usuario

Aparte de diseñar los escenarios virtuales se diseñó una interfaz de usuario que consiste en los menús con los cuales los terapeutas y pacientes estarán en contacto, se tomaron en cuenta tres puntos importantes:

- Psicología del color
- Diseño páginas web centradas en el usuario
- Contraste entre colores

Para diseñar la interfaz de usuario se consideraron los cuatro principios de la organización visual: proximidad, alineación, consistencia y contraste (106).

Para el principio de proximidad, en el menú principal se crearon cinco botones (Figura 34), los cuales representan áreas que agrupan cosas relacionadas. La función de los botones viene explicada en la Tabla 14. En general las funciones se pueden dividir en tres áreas, acciones relacionadas a la cuenta o al juego o a la evaluación. En el caso de la cuenta se decidió dividirlo en tres botones, ya que realizan diferentes acciones o se piden diferentes datos.

Tabla 14: Función de los botones del Menú Principal.

Cuenta			Juegos	Evaluación
Inicio	Crear	Cerrar		
El usuario podrá ingresar sus datos para acceder a los juegos	Contendrá todos los campos necesarios para crear una nueva cuenta, como nombre y edad	Cerrará el ejecutable de Simulink® y guardará los datos del usuario	Contendrá los juegos disponibles, sus características y niveles	Contendrá las escalas clínicas que los terapeutas utilizan comúnmente.



Figura 34: Menú principal del AV.

En el caso del botón *Cerrar sesión* se colocó al final porque es la última acción que hará el usuario antes de terminar una sesión de terapia, y no abrirá ningún menú, solo una ventana emergente que le indicará al usuario que su sesión fue cerrada.

En cuanto a la alineación, en el caso de los botones se eligió una alineación centrada, para que los menús se vieran armónicos, un ejemplo se puede observar en el menú principal, en donde los botones se encuentran centrados y la alineación de texto es centrada. Otro ejemplo se observa en el submenú de *Crear Cuenta* (Figura 35), en donde los botones se encuentran alineados horizontalmente y si existe texto dentro de ellos o dentro de un cuadro de texto, éste se encuentra centrado.

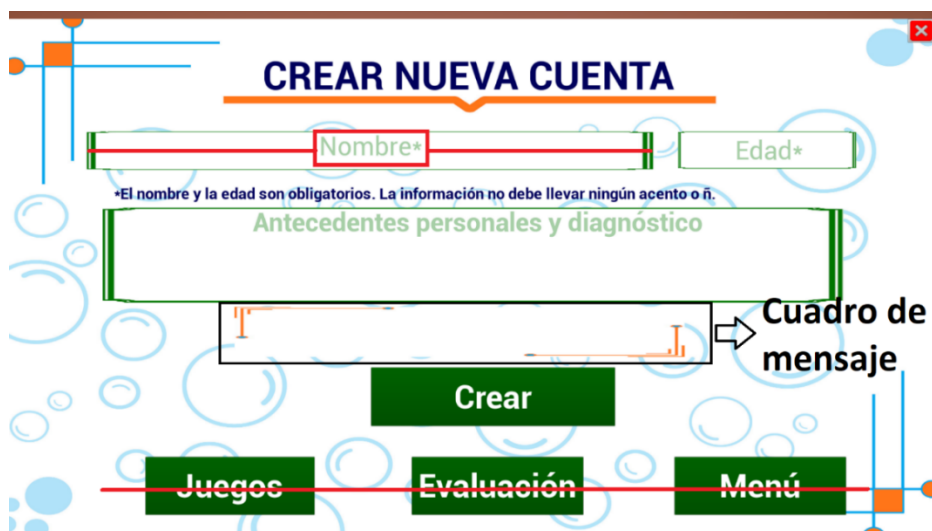


Figura 35: Submenú de Crear Cuenta.

El principio de la consistencia se ve reflejado en la ubicación de ciertos elementos, por ejemplo en todos los juegos en la esquina inferior derecha se encuentra una flecha que al dar clic sobre ella lleva al usuario al menú principal, así mismo si presionan la barra espaciadora los lleva a éste menú (Figura 49, Figura 50).

En el caso de los submenús de *Iniciar sesión* y *Crear cuenta* los botones se encuentran distribuidos de manera similar, al centro después de los cuadros de mensajes se encuentra el botón principal (crear o ingresar) y abajo se encuentran alineados horizontalmente los botones para regresar al menú, juegos y uno adicional (evaluación o crear cuenta) (Figura 36).

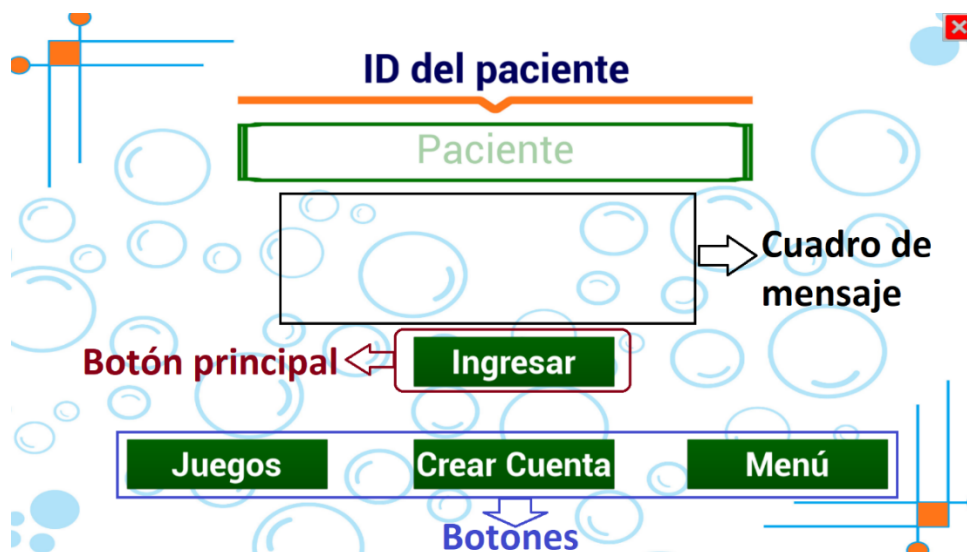


Figura 36: Submenú de Iniciar Sesión.

En cuanto al contraste, es importante que el usuario pueda diferenciar aquellos elementos con los que puede interactuar y con los que no, por lo tanto se eligieron dos colores diferentes para representarlos. De los colores elegidos por la psicología del color, se eligió el color verde para los elementos interactivos, como botones, y azules para los elementos no interactivos, como los textos informativos. Se decidió así porque el azul tiene una relación de contraste mayor que el verde (18.4 comparando con 5.92 del verde). Para obtener la relación de contraste entre colores se utilizó la herramienta <https://contrastchecker.com/> en donde se colocaba el código de color de fondo y el código de color del texto. Cabe destacar que para esta herramienta y para todo el documento se utilizan códigos de colores hexadecimales.

Si bien la psicología del color es un tema reciente dentro de la psicología, es utilizada en áreas de diseño como arquitectura, publicidad y producciones audiovisuales (107). Por lo tanto se decidió elegir los colores de la interfaz de acuerdo a esta teoría:

Se eligió el color blanco porque al ser considerado un color frío tiene un efecto calmante, ya que representa la paz, al mismo tiempo que representa limpieza, siendo importante para el entorno clínico (108), así mismo la luz blanca tiene un impacto positivo en la impresión del usuario y en su satisfacción (109).

El color azul, al igual que el blanco es un color frío por lo que presenta un efecto calmante, ya que representa al descanso y genera placidez ya que no produce cansancio visual. También en el área de publicidad se utiliza en logos que representan confiabilidad y alta calidad como en productos del área de la salud, limpieza y líneas aéreas. Por otro lado la luz azul permite facilitar al usuario estar alerta permitiéndole mejorar su desempeño en las actividades que necesiten concentración (107,110).

El color verde al ser abundante en la naturaleza, se asocia a ésta, a la vegetación o al ambiente, así mismo el verde fue considerado como el color de la medicina, ya que hubo un tiempo en que el verde se utilizó para construir el equipo médico o como un color terapéutico, ya que beneficia tanto a pacientes como a trabajadores como calmante (108,109,111).

En cuanto a los colores cálidos, que se caracterizan por ser energéticos, se seleccionó el naranja ya que se considera un color positivo produciendo entusiasmo o exaltación, es considerado un color con fuerza y energético. No se debe utilizar en grandes extensiones ya que genera cansancio o puede causar una impresión de agresividad o impulsividad (107–109).

Se descartó el color rojo porque está asociado al mal, amor y guerra por lo tanto son sentimientos que no se desean evocar en el entorno, así mismo el rojo o amarillo puede causar ansiedad si se realizan algunas tareas (109).

Después de determinar los colores que iban a estar presentes en la interfaz, se definió en qué parte de la interfaz estarían presentes de acuerdo a la relación de contraste. Para esto se tomó en cuenta uno de los cuatro principios para la accesibilidad de páginas web que es mencionado por las Directrices de Accesibilidad para el Contenido web (WCAG 2.0 por sus siglas en inglés), que consiste en que los textos sean distinguibles, ya que esto permite compensar la sensibilidad al contraste que personas con baja visión o con alguna discapacidad pueden presentar (112), así

mismo se utilizaron los niveles de conformidad en relación al contraste que deben de tener imágenes y textos, en este caso el nivel A es el menos exigente y el AAA el más exigente (113) Para los colores elegidos se decidió utilizar una relación de contraste de 7:1 para el nivel AAA o una relación 5:1 para el nivel AA. Si bien es suficiente con el nivel AA, se decidió considerar en algunas partes de la interfaz el nivel AAA ya que esta relación permite compensar la pérdida de sensibilidad al contraste que se presenta en personas con pérdida de visión, así como permite el realce del contraste (114). Los colores elegidos son:

- El color blanco se utilizó en el fondo de la interfaz y en las letras de los botones. Se eligió porque era el que tenía una relación de contraste aceptable con los otros colores.
- El fondo de los menus generales (para todos los niveles) es de color blanco junto con algunos detalles azules cuyo código hexadecimal es #00A6ED y naranjas (#FF7518) con una opacidad de 18% para que la interfaz fuera más atractiva. Estos detalles dependen del juego al que pertenece el menú; por ejemplo en el menú del juego “**Figuras**” los detalles son figuras geométricas, en el de “**anaqueles**” son productos, en el de “**Atrapar**” son frutas y en el de “**Apilar**” son casas, cubos o ganchos.
- El color azul también se utilizó para los elementos no interactivos, en este caso el azul era más fuerte (#00005B), se eligió en este tono ya que cumplía con la relación de contraste requerida para el nivel AAA.
- El color verde (#007500) se eligió para los elementos interactivos, como botones. Si los botones contenían texto, éste era de color blanco.

Con las características ya mencionadas se crearon todos los menús que pertenecían al AV, como el *Menú principal* y el menú para elegir los juegos. Así mismo se propusieron dos submenús (Figura 37) para los juegos; uno de ellos iba a contener diferentes niveles propuestos por nosotros de acuerdo a la dificultad que se propuso al principio del proyecto o la segunda opción es darle la posibilidad a los terapeutas que ellos cambien las características del juego (tiempo, aciertos, tamaños, velocidad y número de objetos en el entorno). Se propusieron estas dos opciones para que al recibir una retroalimentación de los terapeutas, estos pudieran elegir la opción que considerarán más apropiada para el sistema.



Figura 37: Submenús para elegir la dificultad de los escenarios virtuales.

3.3 Integración de la interfaz háptica con el ambiente virtual

En esta tercera etapa se integró la interfaz háptica al AV que se diseñó en la sección anterior. A continuación, se presenta la descripción de esta interfaz.

3.3.1 Descripción de la interfaz háptica

El DH que se utilizará para el sistema de rehabilitación será un dispositivo de tres grados de libertad con un EF en forma de lápiz (Figura 38). Cada articulación tiene un encoder, los cuales identifican el cambio del ángulo en cada articulación, para poder identificar la posición final del EF mediante la cinemática del robot, mientras que en la parte inferior se encuentra la tarjeta NUCLEO-STM32F767ZI de la empresa STMicroelectronics® que será la encargada de adquirir las señales de los tres encoders, además de que incluye la cinemática de robot y permite la comunicación con el AV. Esta tarjeta permite la comunicación y programación mediante el puerto USB, así mismo cuenta con 144 pines, dentro de los que se encuentran pines de entrada y salida que son capaces de suministrar hasta 25 mA, pines de ADC y timers; contiene una memoria flash de 2 Mbytes y una SRAM de 512Kbytes. Para saber más de sus características consultar su hoja de datos en el siguiente enlace <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f767zi.pdf>. Para que se realice la comunicación de la tarjeta con el AV se utilizará el módulo de alta velocidad UM232H que permite el intercambio de datos entre la computadora y el microcontrolador mediante una conexión USB 2.0 con una velocidad de 3 Mb/s (115).

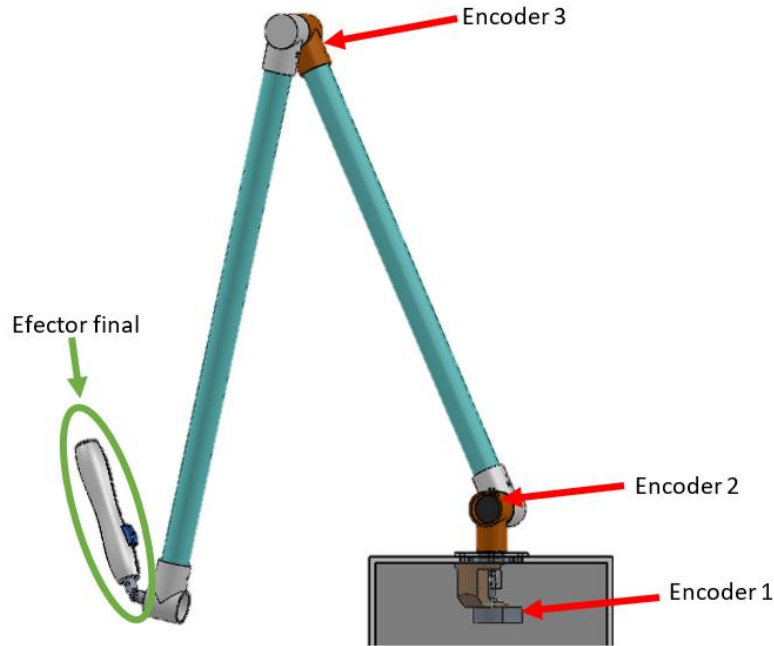


Figura 38: DH de 3 grados de libertad.

El EF (Figura 39) contiene un mini motor DC y un botón conectados a la tarjeta NUCLEO-STM32F767ZI; el motor a su vez se conecta a un transistor BC548 para que proporcione al motor la corriente necesaria (50mA). Para unir el EF con el resto del DH se utiliza un mecanismo tipo cardán, el cual es un componente mecánico que une de dos ejes coaxiales y que permite el movimiento de rotación en distintas direcciones entre dos elementos, que en este caso es el DH (eje conductor) y el EF (eje conducido). Cabe destacar que para obtener la posición del efector final se está tomando en cuenta la parte terminal del tercer eslabón del sistema háptico, por lo tanto, el mecanismo tipo cardán es pasivo, es decir solo permite el movimiento del EF.

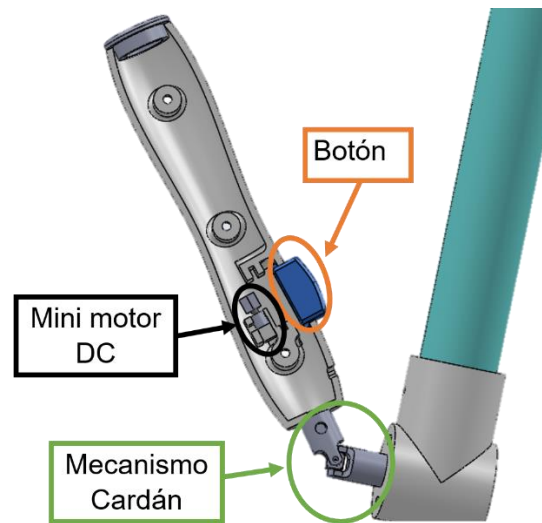


Figura 39: Corte transversal del efector final de DH.

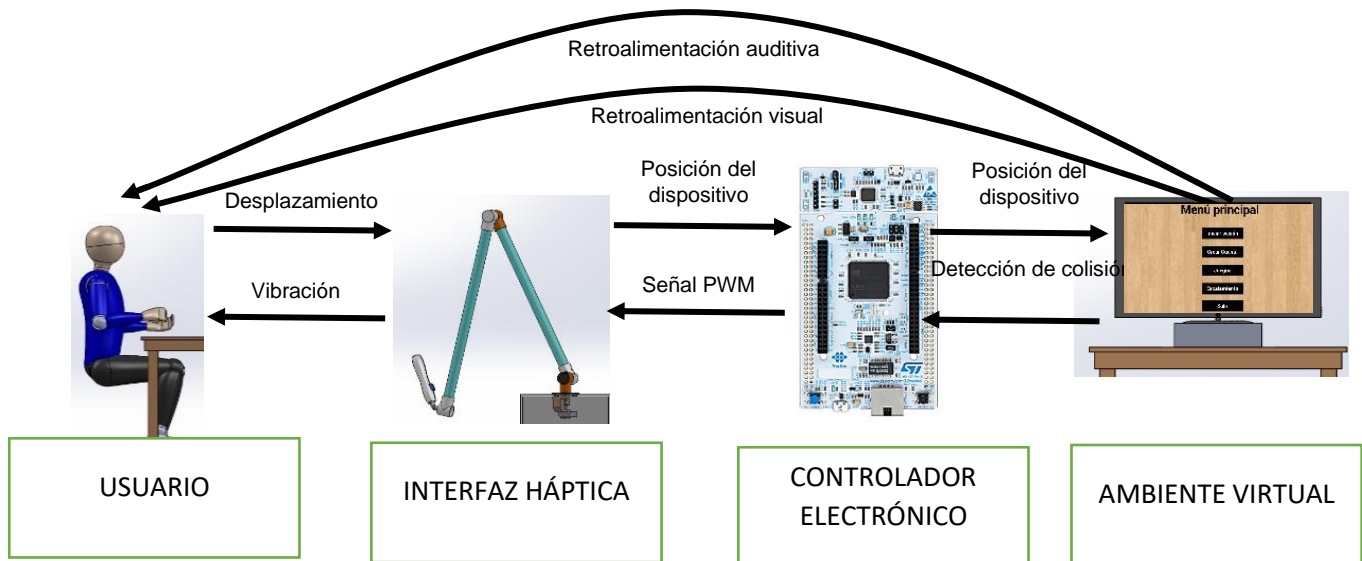
Para la programación de la tarjeta de control electrónico de la interfaz háptica se utilizarán dos softwares STM32Cube® y Simulink® de MATLAB®. STM32Cube® permite la configuración de los pines que se utilizan, además que genera el código de inicialización de la tarjeta (116), por otra parte se utilizaron dos modelos de Simulink®; en el primero se realiza la programación del control de bajo y alto nivel mediante la implementación de las librerías embebidas para la familia Cortex-M7, desarrolladas por el laboratorio PERCRO (Perceptual Robotics) de la Scuola Superiore Sant'Anna de Pisa. En el control de bajo nivel se comandan los pines digitales, el control del PWM, la comunicación USB y la lectura de los encoders, con los cuales se obtienen la posición, la velocidad y el jerk²; mientras que en el control de alto nivel se implementa la cinemática del robot, junto con la inicialización de la posición de la interfaz háptica (calibración). En la siguiente sección se describe el segundo modelo.

3.3.2 Comunicación entre el AV y la interfaz háptica

Para la interfaz de usuario, la comunicación entre el DH y el AV se realizó mediante el protocolo de datagramas de usuario (UDP por sus siglas en inglés), ya que una de las ventajas de este protocolo es que permite minimizar el tiempo de latencia entre los sistemas (90). El envío y la recepción de datos mediante este protocolo tuvo una frecuencia de 100 Hz, esta frecuencia se definió ya que se encuentra dentro de los valores sugeridos de los canales de comunicación en un entorno virtual (Tabla 4), tanto en el visual, el háptico (vibración) y la manipulación del EF.

² El jerk se refiere a la derivada de la aceleración en el tiempo y se utilizan como una representación de la cinemática(124).

La comunicación consistió en el envío de datos por parte de la tarjeta de control del DH, el cual envía información sobre las coordenadas donde se encuentra el EF (misma ubicación que la mano del usuario) y si se ha presionado o no el botón de este elemento; por otra parte, el AV recibe estos datos y los refleja en el ambiente. En caso de que el usuario entre en contacto con un objeto virtual, el AV enviará un valor numérico (entre 0 a 3800) al PWM de la tarjeta de control electrónica para activar el actuador del DH (mini motor DC) y que se reflejará en forma de



vibración (Figura 40).

Figura 40: Diagrama del funcionamiento del sistema de rehabilitación.

3.3.3 Integración del DH con el ambiente virtual

En el segundo modelo de Simulink®, llamado Host, se implementa la comunicación entre el controlador electrónico y la computadora personal (PC), así mismo permite realizar la comunicación UDP entre el AV y el DH (Figura 41). La comunicación entre el AV y el DH se divide en tres secciones (Figura 42), la primera se encarga de la recepción de los datos del AV, la segunda del envío de datos al AV y la tercera del guardado de datos. Los datos subrayados en las dos primeras secciones son aquellos que se guardan en la tercera sección.

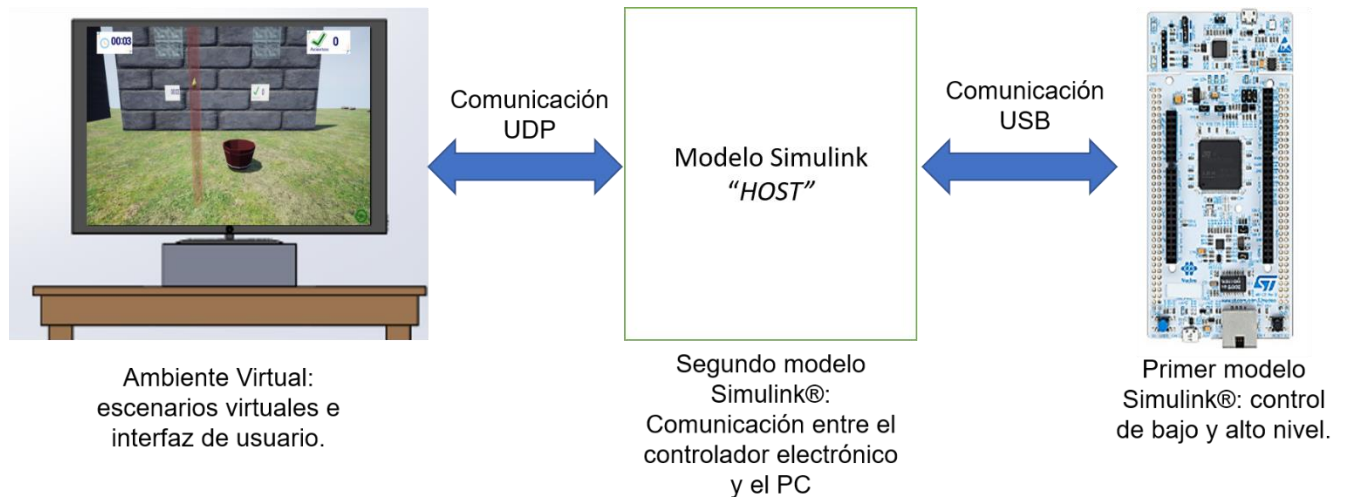


Figura 41: Comunicación entre el AV y los dos modelos Simulink®.

Para la primera sección se utilizó el bloque UDP Receive para Windows, el cual se configuró con el puerto 9090 con una IP remota '0.0.0.0', que es una configuración que acepta cualquier entrada, el tamaño del buffer se configuro para recibir 19 datos del tipo single y con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Los 19 datos que recibe el sistema son:

1. **Posición en X:** Indica la posición en el eje X del EF.
2. **Posición en Y:** Indica la posición en el eje Y del EF.
3. **Posición en Z:** Indica la posición en el eje Z del EF.
4. **PWM:** Indica el valor del PWM (0-3800) para la vibración del mini motor DC que contiene el EF.
5. **Bandera Guardar Datos:** Si está dentro de un juego tiene un valor de uno e indica que se tienen que guardar los datos.
6. **Bandera de colisión:** Indica si el efector final esta colisionando con un objeto virtual (1) o si no existe colisión (0).
7. **Profundidad de la colisión en X:** Al existir colisión indica la profundidad de la colisión entre el EF y el objeto virtual en el eje X.
8. **Profundidad de la colisión en Y:** Al existir colisión indica la profundidad de la colisión entre el EF y el objeto virtual en el eje Y.
9. **Profundidad de la colisión en Z:** Al existir colisión indica la profundidad de la colisión entre el EF y el objeto virtual en el eje Z.
10. **Profundidad total de la colisión:** Al existir colisión indica la profundidad total de la colisión, se calcula obteniendo la distancia entre dos puntos en un plano 3D.

11. Velocidad en X: Indica la velocidad del EF en el eje X.
12. Velocidad en Y: Indica la velocidad del EF en el eje Y.
13. Velocidad en Z: Indica la velocidad del EF en el eje Z.
14. Número de juego y nivel: Valor entre 1 y 13, el cual indica en qué nivel y en que juego se encuentra el usuario. Este valor entra en un case para indicar el nombre de la variable en que se guardarán los datos.
15. Jerk en X: Indica el Jerk del EF obtenido en el eje X.
16. Jerk en Y: Indica el Jerk del EF obtenido en el eje Y.
17. Jerk en Z: Indica el Jerk del EF obtenido en el eje Z.
18. Número de aciertos: Indica el número de aciertos que el usuario va sumando.
19. Stop: Bandera que al tener un valor de 1 se cierra el ejecutable.

En la segunda sección, para el envío de datos se utilizó el bloque UDP Send para Windows, el cual se configuró con una IP local '127.0.0.1' y con el puerto remoto 9097 y los datos que envía al AV son los calculados por la cinemática del robot:

1. Posición del EF en X.
2. Posición del EF en Y.
3. Posición del EF en Z.
4. Estado del botón (0/1).
5. Velocidad en X.
6. Velocidad en Y.
7. Velocidad en Z.
8. Jerk en X.
9. Jerk en Y.
10. Jerk en Z.

En la tercera sección se guardan los datos, al terminar de ocupar el Sistema de Rehabilitación en una variable de tipo (.mat). Para cada usuario se crean dos carpetas, una para cada sistema de visualización. En cada carpeta se guardan 13 archivos, uno por cada nivel de cada juego.

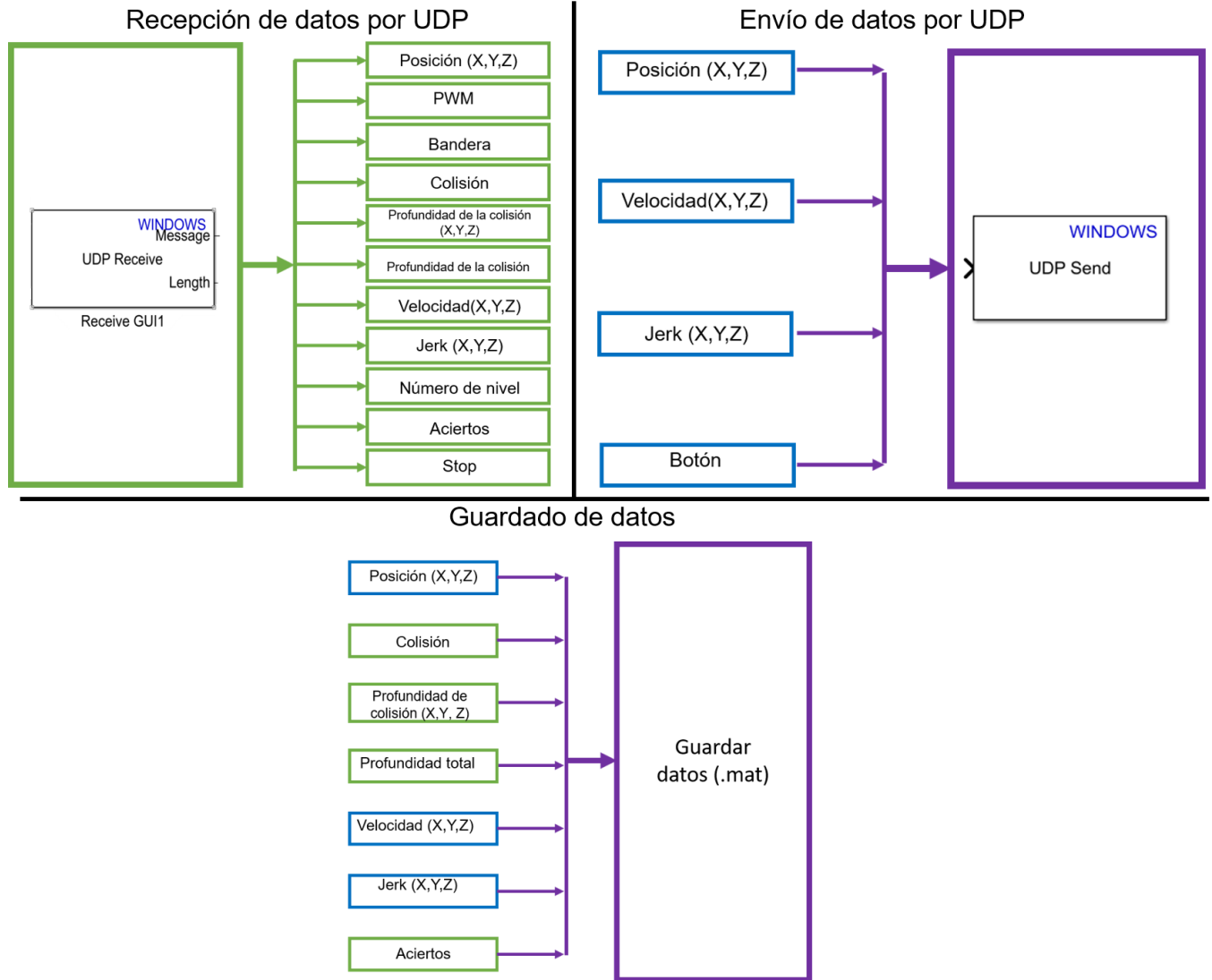


Figura 42: Secciones de la comunicación entre el AV y el DH del modelo Simulink® "Host".

Después de tener el modelo Simulink® se creó el ejecutable para que automáticamente se ejecutará junto con el AV. Para crear el ejecutable se configuró el modelo, se eligió un solver de paso fijo (fixed step) y discreto, con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz y en la implementación de Hardware se eligió como archivo de destino el código ert.tlc, se eligió la familia de dispositivos compatibles con ARM y en específico el dispositivo la ARM Cortex. Posteriormente se creó el ejecutable del modelo y el packNgo, el cual es una función de Simulink que crea una carpeta comprimida con todos los archivos, como librerías, que permiten reconstruir el proyecto sin la necesidad de tener instalado MATLAB.

Por lo tanto, el sistema está compuesto de una computadora o laptop, del sistema de visualización, que puede ser el monitor o un HMD, el monitor puede ir junto a la computadora y

el HMD está integrado por el visor y por la base station, y por el DH que a su vez este compuesto de la interfaz háptica y del controlador electrónico (Figura 43).

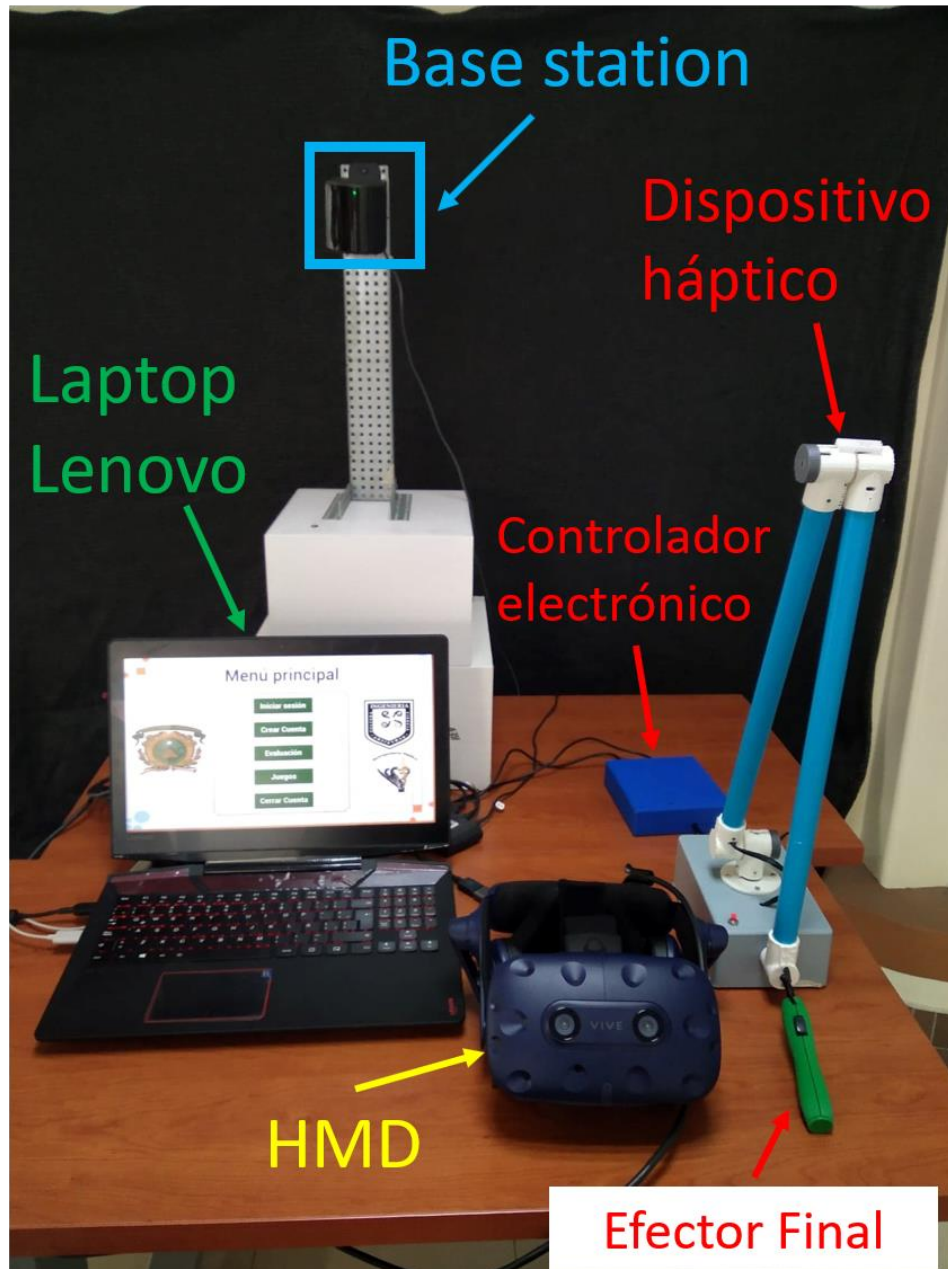


Figura 43: Componentes del Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior.

El controlador electrónico se colocó dentro de una caja impresa en 3D, cuyo diseño se realizó específicamente para contener la tarjeta NUCLEO-STM32F767ZI y el módulo UM232H (Figura

44). La caja tiene dos entradas para la conexión de los cables USB, tiene una entrada para poder presionar el botón de reinicio de la tarjeta núcleo y tiene un conector DA-15.

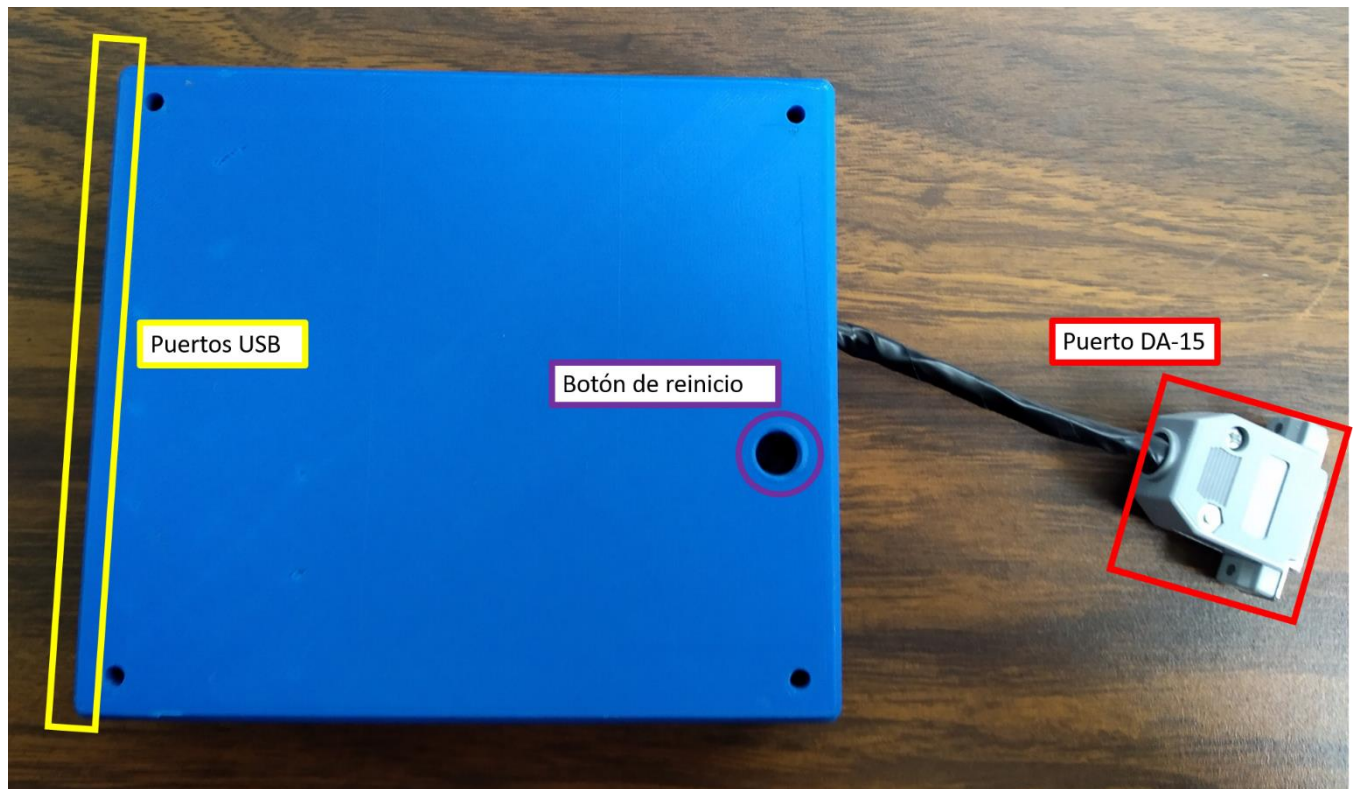


Figura 44: Caja impresa en 3D que contiene el controlador electrónico del DH.

Para conectar el DH al AV se necesitan un cable USB con conexión micro USB para conectar la tarjeta núcleo y un cable USB con conexión mini USB, los cuales van conectados a la caja del controlador electrónico (Figura 45) y se conectan a los puertos USB de la computadora. Del otro lado de la caja se encuentra un conector hembra de 15 pines, el cual se conecta a la interfaz háptica, que tiene una entrada macho de 15 pines.

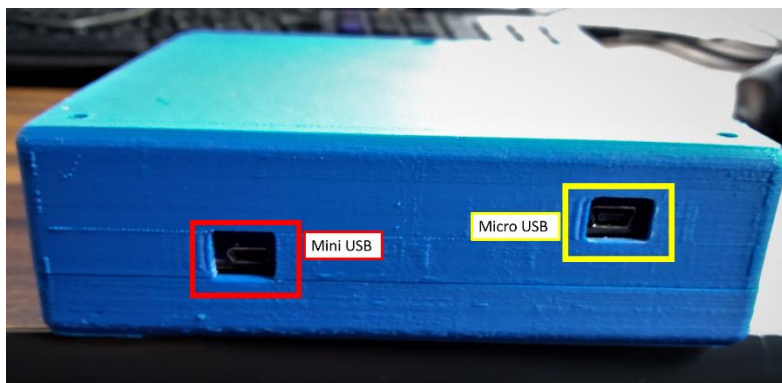


Figura 45: Vista frontal de la caja donde contiene la entrada para un puerto mini USB y Micro USB.

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE REHABILITACIÓN

Al tener la primera versión del sistema de rehabilitación se realizó una primera evaluación, en la cual se realizaron encuestas a personal especializado para recibir una retroalimentación sobre éste, conocer que tan usable es y si cumple la funcionalidad requerida para su implementación en un entorno clínico. Estos cuestionarios se basaron en la Escala de Usabilidad de un Sistema (SUS, por sus siglas en inglés), que consiste en diez puntos de los cuales el usuario tiene que indicar si está de acuerdo o en desacuerdo con ellos mediante una escala de cinco puntos (117) y en el cuestionario AttrakDiff, que se utiliza para evaluar la experiencia con un producto y la atracción que este genera al usuario mediante cualidades hedónicas como las necesidades emocionales, y pragmáticas como su utilidad y usabilidad (81,118); además que se agregarán preguntas generales sobre el funcionamiento del sistema y su aplicación en el entorno clínico. Después de obtener los resultados de esta encuesta se realizaron mejoras en el AV.

Se aplicaron cinco encuestas (Anexo 2) a terapeutas del CICMED de la UAEMéx, para saber si la interfaz les parece fácil de usar y si los colores y menús son fáciles de entender. Se aplicaron este número de encuestas por dos razones, la primera es que era el número de terapeutas disponibles en el CICMED y nos iba a permitir observar cerca del 80% de los problemas de usabilidad (85). Esta encuesta esta dividida en cuatro secciones, la primera sección consiste en 13 enunciados que se centran en conocer si los terapeutas pueden utilizar este sistema en su entorno clínico, además de que se encuentra la escala de usabilidad (SUS); la segunda parte es para conocer como ven la interfaz en el ámbito estético con la escala AttrakDiff; la tercera es para conocer que escalas clínicas creen necesarias o más útiles para que esten presentes en el Sistema de Rehabilitación; y por último se le pide al terapeuta que seleccione una opción de menú para elegir la dificultad de los juegos (Tabla 16). Las escalas elegidas se consideraron tanto por los resultados obtenidos en el primer cuestionario y se propusieron nuevas escalas que se utilizan para evaluar el ACV.

Los resultados obtenidos se mencionan a continuación:

Las primeras tres preguntas del Anexo 2 obtuvieron una respuesta positiva en relación al uso del Sistema de Rehabilitación en el campo clínico, ya que los terapeutas estan de acuerdo en que los pacientes estarían motivados al utilizar el sistema, así como que los contenidos son

apropiados para ellos (Figura 46). Solo un terapeuta se encontró indeciso ante la primera pregunta, donde no sabía si el sistema era fácil de usar en el entorno clínico.

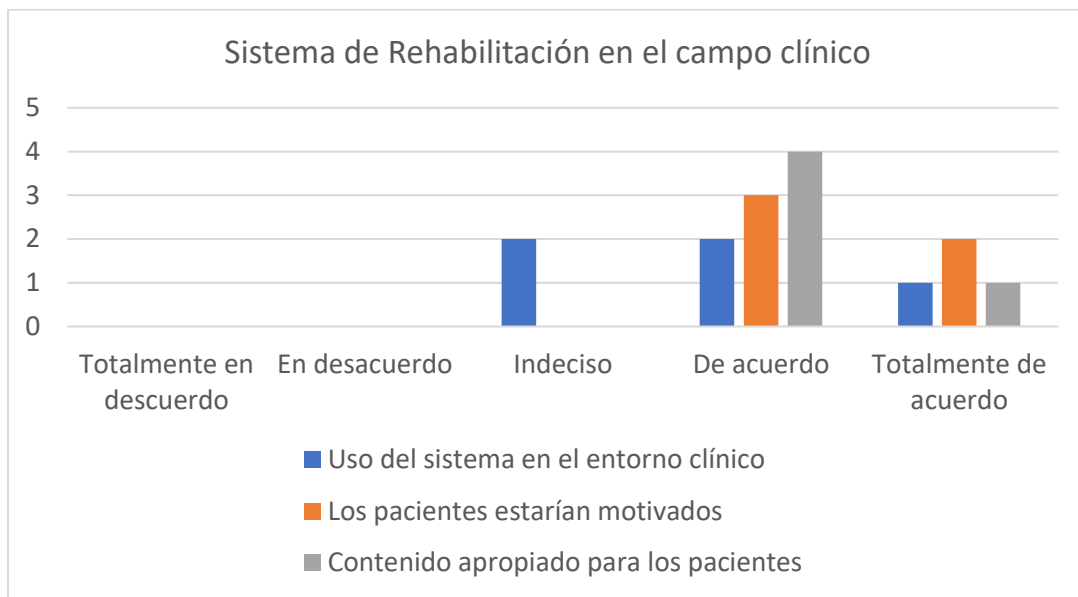


Figura 46: Gráfico sobre el uso del Sistema de Rehabilitación en el campo clínico.

En cuanto a SUS, el promedio del puntaje en una escala de 0 a 100 es de 78. Por lo tanto representa un grado B+, ya que se encuentra entre el percentil 80 y 84 (Tabla 5) y de acuerdo con la escala de adjetivos (85) se describiría como un Sistema con una usabilidad buena.

Así mismo se les pidió evaluar la estética de la interfaz mediante la escala AttrakDiff, los resultados se presentan a continuación. En el diagrama de pares de palabras (Figura 47) se observa que existen valores justo en la parte media del diagrama, siendo estas características que se tienen que mejorar en gran medida, se tiene que hacer el sistema más predecible, así mismo se tienen que realizar cambios para que en la parte estética no luzca “barato”, cabe destacar que la palabra barato se utilizó para describir un sistema que luce ordinario, con materiales “corrientes” o un sistema de poco valor que implica tanto los materiales de los que está construido como el trabajo que se ve reflejado en el AV. Ninguna palabra obtuvo el mayor puntaje, siendo la más alta y la única que se encuentra sobre el dos, que los usuarios consideran el sistema práctico. Dentro de las cualidades pragmáticas se debe mejorar que el sistema debe simplificarse y estructurarse más. En cuanto a las cualidades hedónicas el sistema debe estilizarse y ser más creativo para poder ser más cautivador para los usuarios. Las cualidades estéticas del sistema también deben de mejorarse para que el usuario lo considere “bueno”.

Descripción de pares de palabras

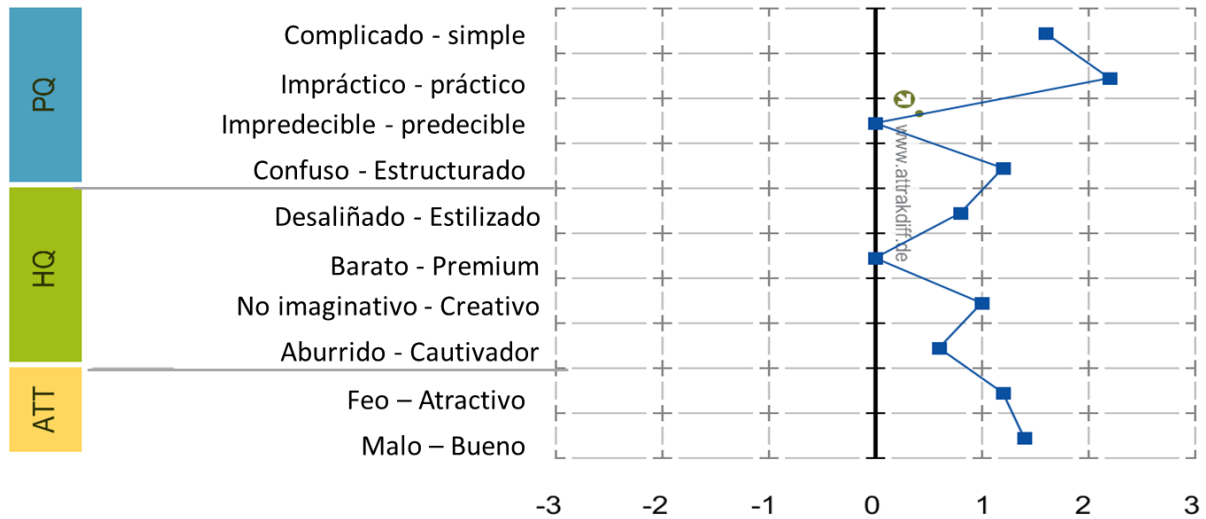


Figura 47: Diagrama de pares de la evaluación del Sistema de Rehabilitación por terapeutas.

En cuanto a las medias de las diferentes secciones del cuestionario, las cualidades estéticas obtuvieron la media más alta con un valor de 1.3, las cualidades pragmáticas le siguieron con un promedio de 1.25 y las cualidades hedónicas obtuvieron el promedio más bajo de 0.6. Esto nos indica que se deben mejorar las cualidades que describen la calidad del sistema y su cumplimiento con la parte psicológica del sistema.

En la Figura 48 se puede observar que nuestro Sistema se describe como un sistema orientado a las tareas, ya que el cuadrado azul se encuentra en esta sección, aunque el rectángulo que representa el intervalo de confianza abarca dos secciones e incluso sale de ellas, por lo tanto, los datos son muy dispersos para asegurar que se encuentre en esta sección.



Figura 48: Representación del tipo de sistema que es el Sistema de Rehabilitación.

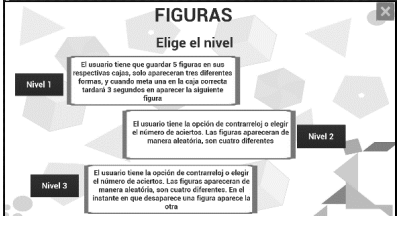

De las escalas que los terapeutas creen necesarias o útiles en el sistema (Tabla 15), los cinco terapeutas encuestados eligieron la escala de Brunnstrom, la escala de Ashworth modificada y el índice de Barthel; cuatro de los cinco terapeutas creen conveniente colocar la escala de Daniels, la escala de Pfeifer solo fue elegida por tres personas, mientras que la escala de Rankin y la escala visual analógica para la evaluación del dolor solo fueron elegidas por dos terapeutas. Por lo tanto sólo se consideraron las escalas en las que cuatro o cinco terapeutas coincidieron en que eran útiles para incluir en el sistema.

Tabla 15: Resultados de que escalas son útiles en el Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior.

Nombre de la escala	Número de terapeutas que la seleccionaron
Escala de Brunnstrom (espasticidad)	5
Escala de Daniels (Valoración muscular)	4
Escala modificada de Ashworth (Tono muscular)	5
Índice de Barthel (Actividades de la vida diaria)	5
Escala Pfeifer (Deterioro cognitivo)	3
Minimental test (Evaluación cognitiva)	1
Evaluación del dolor (EVA)	2
Escala de Rankin (Actividades de la vida diaria)	2

En cuanto a como elegir la dificultad de los juegos, cuatro de los cinco terapeutas eligieron por niveles, mientras que solo uno eligió que se pudieran modificar varias características (Tabla 16).

Tabla 16: Resultados de qué tipo de elección para elegir la dificultad prefieren los terapeutas

Elección de la dificultad		
Número de terapeutas	1	4

Después de recibir esta retroalimentación se realizaron los cambios pertinentes en la interfaz, como incluir las cuatro escalas clínicas (Brunnstrom, Ashworth, Daniels y el índice de Barthel), así como simplificar el sistema y agregarle algunas características para que fuera más fácil de entender. A continuación se presentan algunos de los cambios:

- En el submenú de juegos se añadió la funcionalidad de botón a las imágenes de cada escenario virtual, así cuando el usuario diera clic sobre el nombre o la imagen lo iba a llevar al menú de niveles de ese escenario.
- En el menú de *Iniciar Sesión* el usuario no tiene que apretar el botón de ingresar necesariamente, ya que al dar “enter” cumple la misma función.
- En el menú principal se agregaron los escudos de la UAEMéx, el de la Facultad de Ingeniería y el de la Licenciatura en Bioingeniería Médica.
- Los escenarios se adaptaron para que se utilizaran con monitor o con el Visor de Realidad Virtual
- Se agregó la función de salir del juego presionando la tecla espacio.
- En cada escenario se agregaron otros objetos 3D para que el entorno se viera más real. Por ejemplo en los entornos “Apilar” y “Atrapar” se colocaron construcciones.

Al agregar estas características se obtuvo la segunda versión del AV y por lo tanto de los escenarios virtuales, cada uno de los cuales tenía un reloj en la parte superior izquierda y en la parte superior derecha se visualizaba el número de aciertos que iba sumando el usuario, así mismo un cambio que se realizó en todos los escenarios fue que al botón de menú se cambió la imagen que lo representaba de un recuadro verde con la palabra “Menú” a un flecha también de color verde. En el escenario “Figuras” se aumentó el tamaño de las cajas y los colores de las

figuras cambiaban aleatoriamente para que el usuario no se acostumbraba que cierto color representaba una figura (Figura 49).

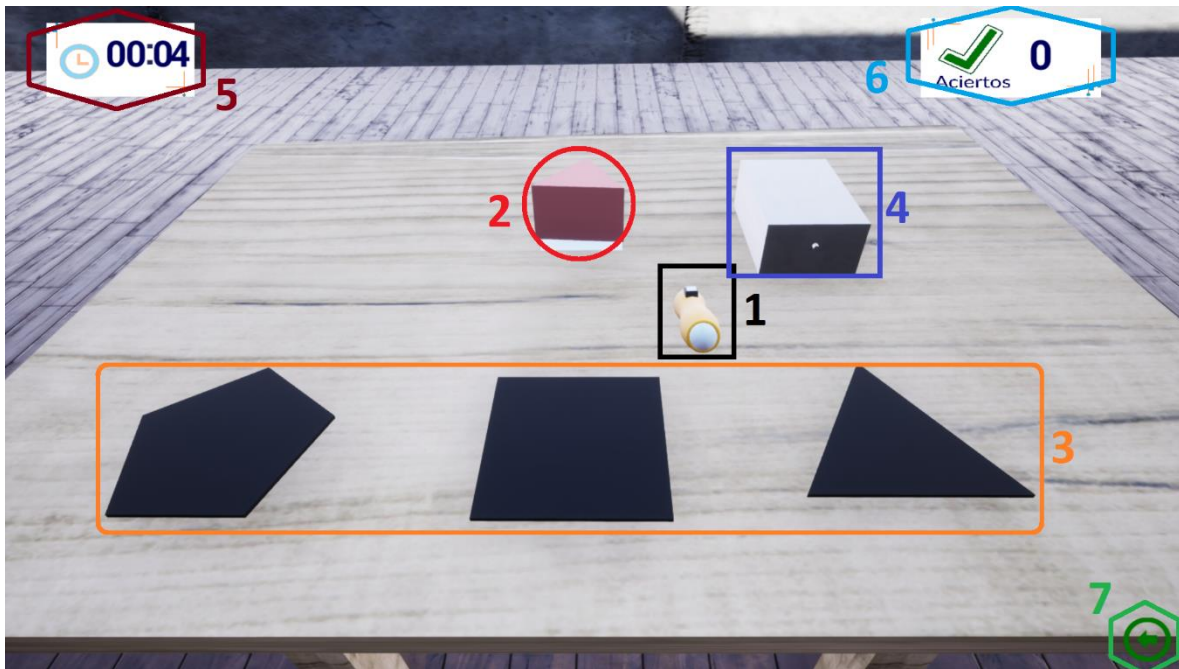


Figura 49: Versión final del escenario virtual “Figuras” y sus elementos.

1. Representación del EF Para este escenario el usuario tiene que mover el lápiz para agarrar las figuras.
2. Figura a mover: Esta figura cambiará de forma, puede aparecer un triángulo, un cubo, un prisma hexagonal o un prisma pentagonal. La figura puede tener diferentes colores.
3. Cajas: El usuario debe mover la figura a la caja que coincida con su forma, cuando la figura se encuentre sobre la caja de manera centrada haciendo contacto, el usuario la debe soltar, si la forma es correcta el usuario sumará un acierto y la figura desaparecerá, apareciendo una nueva figura al centro de la mesa.
4. Representación de la caja del DH: La caja sólo es una presentación de la caja gris del DH.
5. Reloj: Muestra los segundos y minutos que el usuario ha pasado dentro del juego.
6. Aciertos: Muestra el número de aciertos que va sumando el usuario.
7. Botón menú: Al dar clic en este botón el usuario sale del juego y regresa al menú principal.

Al igual que en el Menú Principal, en el escenario de “Anaqueles” se agregaron los escudos de la UAEMéx, de la Facultad de Ingeniería y el de la Licenciatura en Bioingeniería Médica al fondo y se agregaron los nombres de los productos para que fueran fáciles de visualizar. Así mismo se

agregó la lista de compras, que permite leer los productos que el usuario necesita agregar al carrito de compras (Figura 50).



Figura 50: Versión final del escenario virtual “Anaqueles”.

1. Representación del EF: Para este escenario los movimientos que el usuario realice se verán reflejados en una mano.
2. Productos: Son cualquiera de los objetos que se encuentran en el estante medio o alto como las botellas de agua, las bolsas de papas y cereales.
3. Carrito de compras: El usuario debe colocar los productos en el carrito de compras para sumar un acierto.
4. Flecha avanza: Cuando el usuario coloque el EF sobre la flecha y presione el botón del DH, está se activará y moverá el carrito de compras hacia delante.
5. Flecha atrás: Cuando el usuario coloque el EF sobre la flecha y presione el botón del DH, está se activará y moverá el carrito de compras hacia atrás.
6. Botón menú: Al dar clic en este botón el usuario sale del juego y regresa al menú principal.
7. Lista de compras: En este recuadro el usuario podrá visualizar los productos que necesita tomar y colocar en el carro de compras, estos productos aparecerán de color negro y a lado del nombre se muestra el número faltante de esos productos, cuando ya no hace falta ese producto su nombre se vuelve de un color azul claro.
8. Reloj: Muestra los segundos y minutos que el usuario ha pasado dentro del juego.

9. Aciertos: Muestra el número de aciertos que va sumando el usuario.

En el escenario “Atrapar” la velocidad con la que caían las frutas disminuyó y se cambio el tiempo en que caía cada tipo de fruta para que no coincidieran al tocar el suelo.

En este mismo escenario se agregó una guía a las frutas para saber exactamente donde iban a caer, así como diferentes construcciones y se centró la ubicación de la canasta para que estuviera alejada de la cámara (Figura 51).

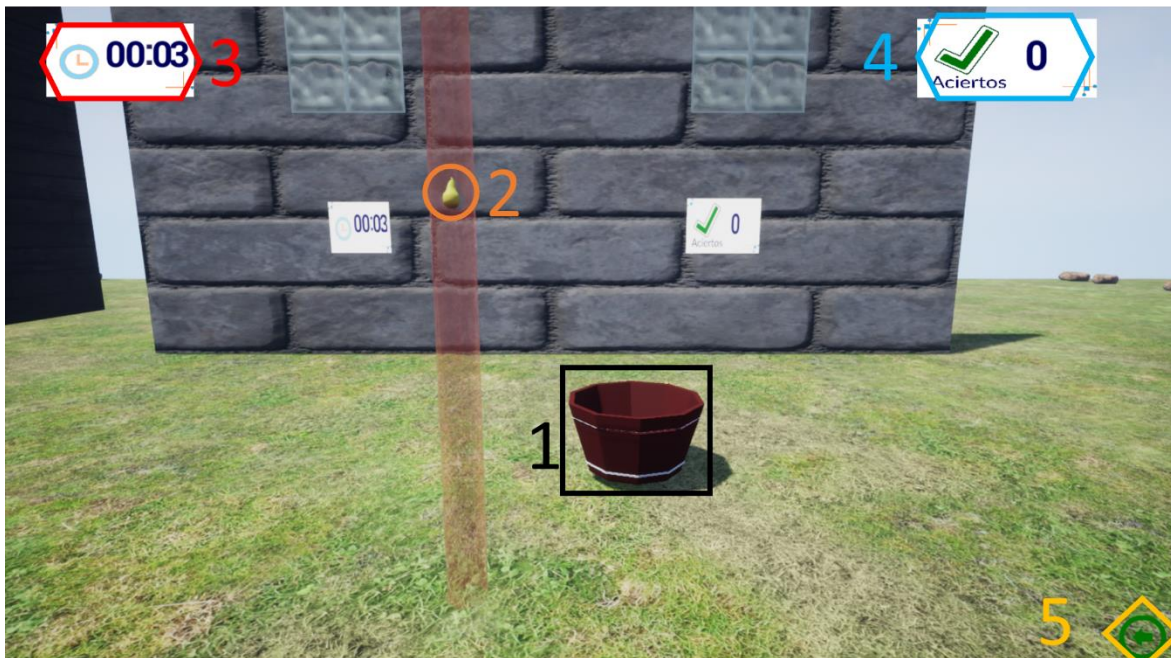


Figura 51: Versión final del escenario virtual “Atrapar” y sus elementos.

1. Representación del EF: Para este escenario los movimientos que el usuario realice se verán reflejados en una canasta.
2. Frutas: Las frutas caerán del cielo y el usuario las tiene que atrapar. Son kiwis, peras, naranjas o plátanos. En el último nivel también caerán gusanos, los cuales tienen que ser esquivados.
3. Reloj: Muestra los segundos y minutos que el usuario ha pasado dentro del juego.
4. Aciertos: Muestra el número de aciertos que va sumando el usuario.
5. Botón menú: Al dar clic en este botón el usuario sale del juego y regresa al menú principal.

Por último al escenario “Apilar” se le agregó una guía que salía de la base, se disminuyó el tamaño de los bloques y solo se mantuvo un tipo de bloque (el verde), se agregaron construcciones al fondo y la perspectiva de la cámara cambió, se acercó más hacia el suelo (Figura 52).

1. Representación del EF: Para este escenario los movimientos que el usuario realice se verán reflejado en un gancho.
2. Bloques: Son los objetos que el usuario tiene que tomar e irlos apilando.
3. Base: El usuario debe colocar el primer bloque sobre esta base, es el inicio de la torre de bloques que debe formar el usuario.
4. Guía virtual: Es una ayuda para el usuario, indica la posición donde es correcto colocar el bloque para formar la torre.
5. Reloj: Muestra los segundos y minutos que el usuario ha pasado dentro del juego.
6. Aciertos: Muestra el número de aciertos que va sumando el usuario.
7. Botón menú: Al dar clic en este botón el usuario sale del juego y regresa al menú principal.

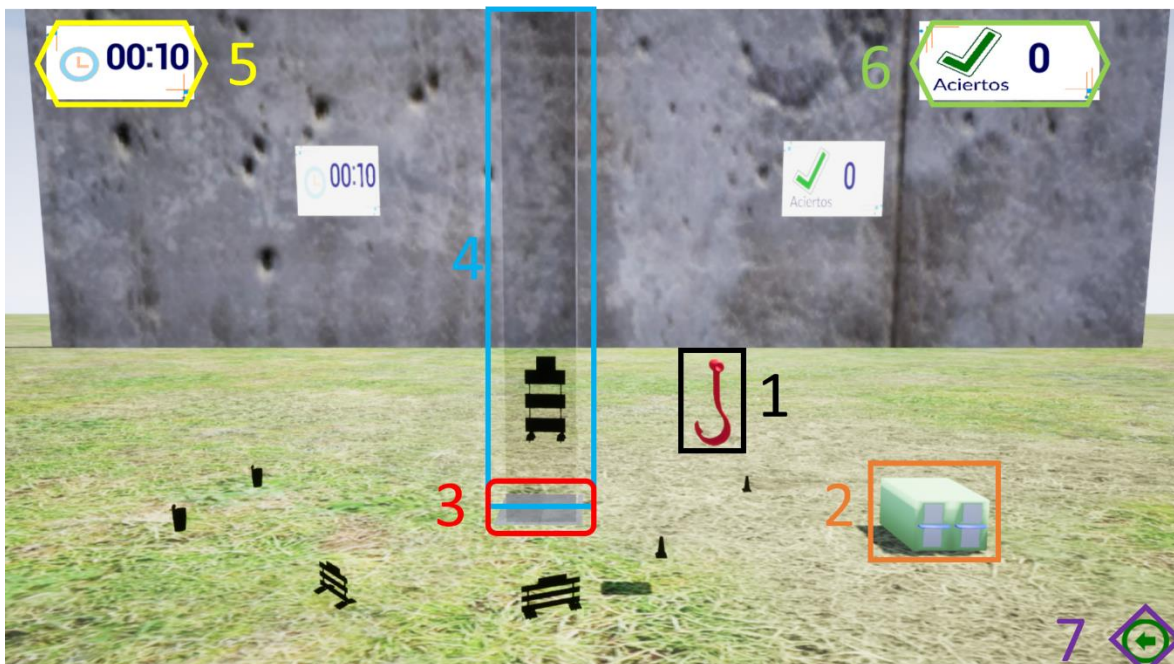


Figura 52: Versión final del escenario “Apilar” y sus elementos.

Para que el sistema fuera más predictivo y estructurado también se realizaron cambios en la retroalimentación visual, por ejemplo, en la lista de compras en el escenario de Anaqueles, se modificaron los colores de los productos de la lista. Al iniciar el escenario, todos los productos que el usuario tiene que tomar se presentan en color negro, y conforme los vaya tomando y colocando en el carrito de compras cambia el color del texto a un azul claro. (Figura 53).

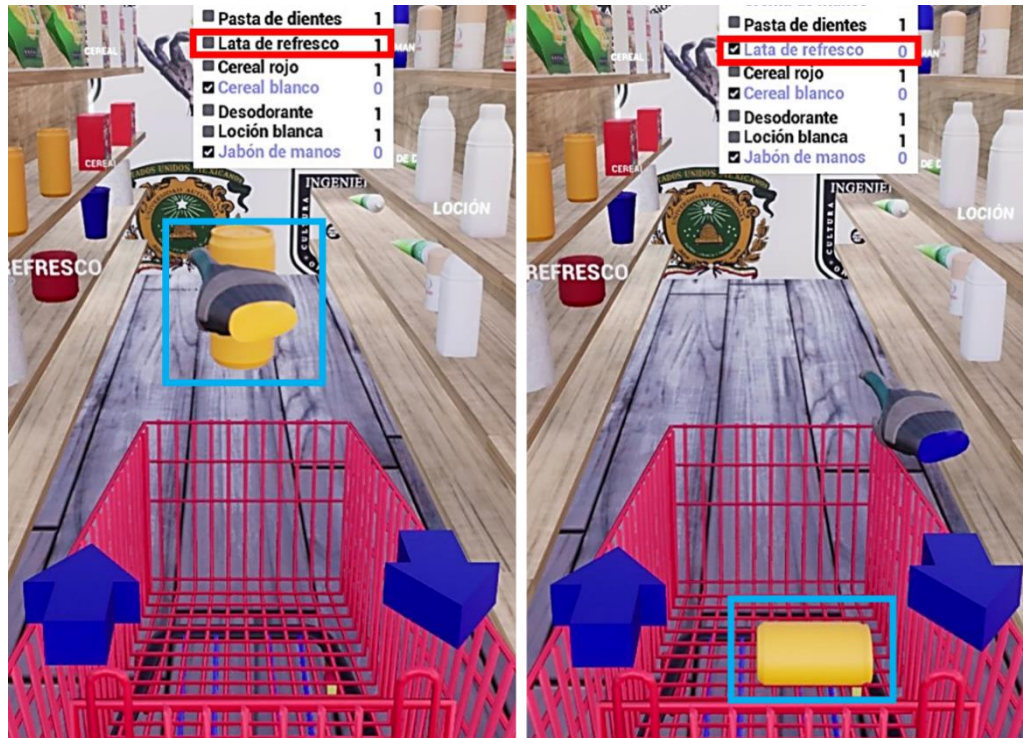


Figura 53: Cambio de color en la lista de compras en el escenario “Anaqueles”.

Así mismo en el escenario “Apilar” se agregaron otros elementos de retroalimentación visual para que el AV fuera más simple y entendible. En este caso el bloque cambiaba a color naranja para indicarle al usuario que se encontraba dentro de la guía virtual y que si se soltaba en esta posición iba a sumar un acierto, en caso de que el usuario saliera de esta guía, el bloque regresaba al color verde del inicio (Figura 54).

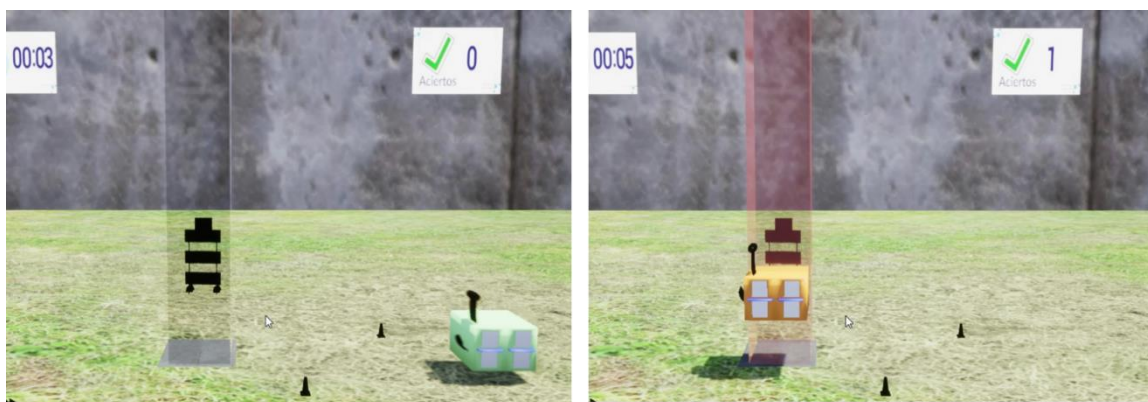


Figura 54: Retroalimentación visual en el escenario “Apilar”.

Ya con estos cambios el diagrama de bloques del AV se presenta en la Figura 55.

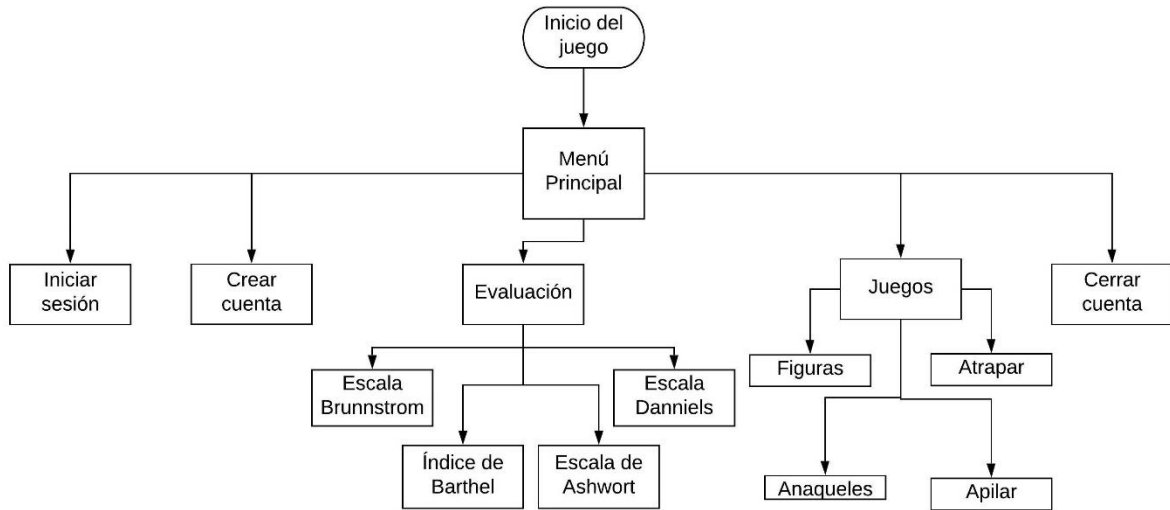


Figura 55: Diagrama de bloques de los menús del AV.

El flujo del AV se comporta básicamente de la siguiente manera, destacando que la mayor interacción con los menús recaerá en el terapeuta, ya que el usuario no podrá elegir el nivel del juego ni evaluar su estado por medio de las escalas cénicas sin que el terapeuta esté presente y le indique que colocar:

El AV inicia en un menú principal (Figura 56), el cual está conformado por cinco botones, donde los cuatro primeros representan submenús y el último solo cierra la sesión del usuario: *Iniciar sesión*, *Crear cuenta*, *Evaluación*, *Juegos* y *Cerrar cuenta*. Al entrar al juego solo tres de los cinco botones se encuentran habilitados, mientras que al iniciar sesión se habilita el botón de evaluación y el de juegos.



Figura 56: Menú principal.

El usuario debe de tener una cuenta para poder ingresar a los juegos y a la evaluación, la cual debe ser creada cuando el usuario ingresa por primera vez y se crea mediante el botón *crear cuenta*, el cual abre otra pantalla donde se piden dos datos obligatorios, el nombre, (sin ningún carácter especial), y la edad, e información opcional como los antecedentes o notas del paciente, que el terapeuta, sí cree necesario, deberá escribir. Dentro de este submenú se encuentran 3 botones: *Crear*, *Menú*, *Juegos*. Al dar clic en *Crear*, el AV asignará un identificador al usuario, el cual estará conformado por la primera letra de su nombre, seguido de la primera letra de su segundo nombre o apellido y al final su edad (Figura 57). Con este identificador el usuario puede ingresar al sistema las veces que el desee, y sus datos se guardaran en un archivo Excel con este identificador. Al crear la cuenta, automáticamente se inicia sesión, se inhabilita el botón de *Crear*.



Figura 57: Submenú Crear Cuenta.

En caso de que no se haya creado la cuenta y se dé clic en el botón de evaluación o de Juegos, el sistema permanecerá en este submenú y mostrará una leyenda de “Falta crear la cuenta”.

Si el usuario ya tiene una cuenta puede ingresar mediante el botón *Iniciar sesión*, en donde se le pedirá ingresar el identificador del usuario, en este submenú existen tres botones que permiten pasar al submenú de juegos, al menú principal o al submenú de crear cuenta. El botón *Juegos* o el de *Evaluación* sólo funcionarán cuando el usuario haya ingresado correctamente, en caso de que se dé clic sin haber ingresado la interfaz manda el mensaje “La cuenta no ha sido creada”.

Cabe mencionar que el sistema permite realizar pruebas de demostración sin crear un usuario, ya que automáticamente el sistema crea la cuenta “prueba1”, por lo que se puede ingresar al menú de juegos con este identificador sin necesidad de crear una cuenta.

Por otra parte, el submenú de *Evaluación* contiene cuatro escalas clínicas, las cuales serán utilizadas por los terapeutas. Estas cuatro escalas son las siguientes: la escala de Brunstrom que mide las etapas de la recuperación motora, la escala Daniels que permite una valoración de la escala muscular, la escala modificada de Ashworth que valora la espasticidad presente en el usuario y por último el índice de Barthel que permite observar que tan independiente es el paciente en sus actividades de la vida diaria (Figura 58).



Figura 58: Submenú de Evaluación Clínica.

Al entrar en cada una de las escalas el terapeuta puede seleccionar la opción u opciones marcando la casilla que represente el estado del paciente según sus observaciones. En esta ventana aparecen dos botones, el de guardar (o calcular en caso del Índice de Barthel) que como su nombre lo indica guarda en Excel la selección que indicó el usuario, y el otro botón se encuentra en la esquina superior derecha representado con un cuadro rojo con un tache blanco y es para cerrar la ventana sin guardar ningún cambio (Figura 59). Al presionar alguno de los dos botones el usuario regresará al submenú de *evaluación* para poder entrar a otra escala o para regresar al menú principal.



Figura 59: Pantallas de las escalas clínicas.

El último submenú, el de *Juegos*, se compone del título de cada juego, abajo del título una imagen del escenario virtual, y si se coloca el cursor sobre la imagen se muestra una pequeña explicación sobre de que trata el juego (Figura 60).

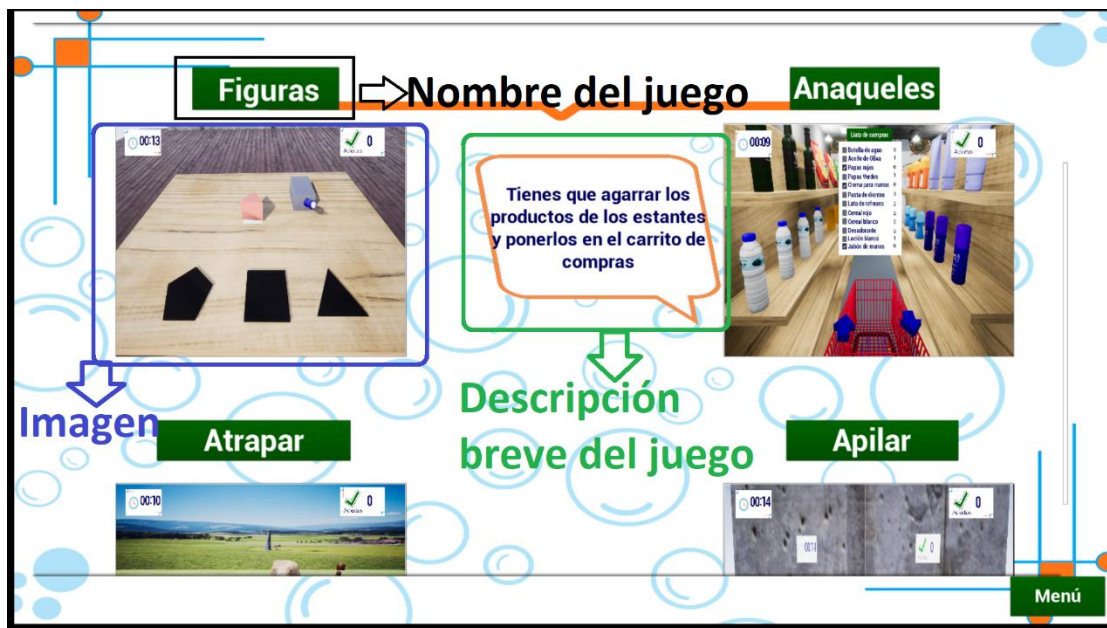


Figura 60: Submenú de juegos.

Para abrir el juego el usuario tiene que dar clic en el nombre del juego o en su imagen. Al dar clic se abrirá una nueva ventana donde se muestra el número de niveles que tiene el juego y la descripción de cada uno (Figura 61).

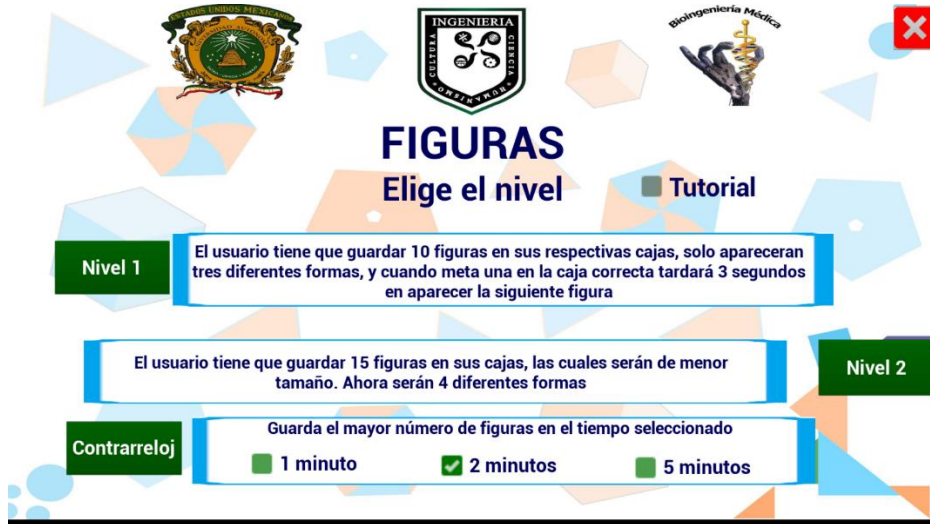


Figura 61: Menú de niveles del escenario “Figuras”.

Al dar clic sobre un nivel el escenario elegido se abrirá. Al inicio de cada nivel aparecerán instrucciones básicas sobre el juego, y hasta el final de las instrucciones se mostrará el nivel elegido y el objetivo de éste (Figura 62). Las instrucciones sólo desaparecerán cuando el usuario haya presionado el botón del DH.

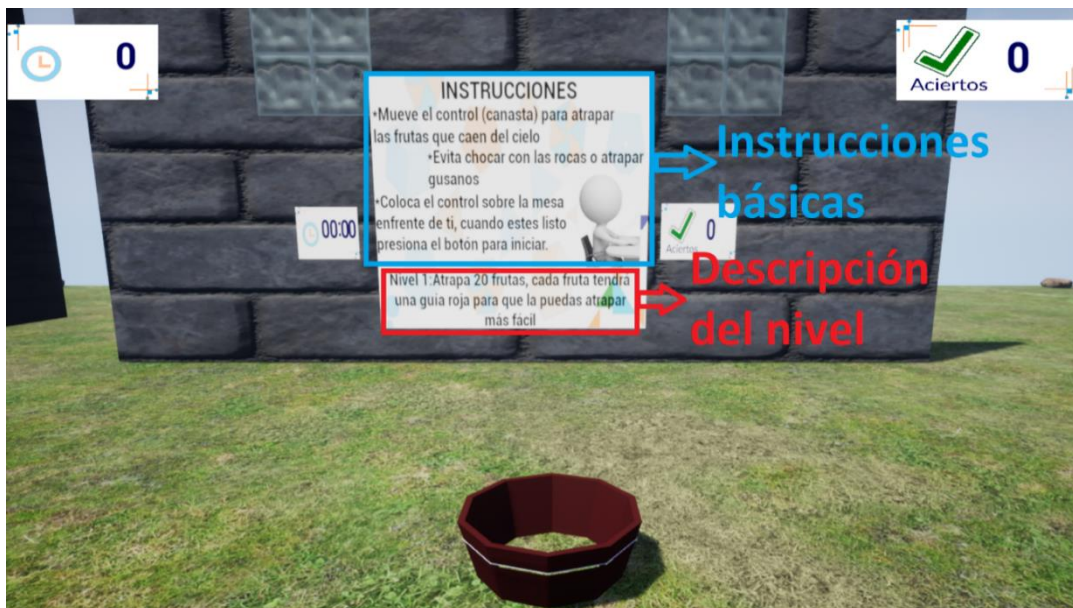


Figura 62: Inicio del juego “Atrapar”.

Al finalizar el juego, ya sea por tiempo, por conseguir el número de aciertos o por el número de errores aparecerá en la pantalla el menú de *fin de juego*, el cual contendrá tres diferentes botones el de *Siguiente nivel*, *reintentar* y *juegos* (Figura 63). El botón de *siguiente nivel* sólo estará habilitado si existe un nivel más alto en el juego, sino se deshabilitará. Con el botón *reintentar* se volverá a jugar el mismo nivel y por último el botón *juegos* permitirá ir al submenú de juegos.



Figura 63: Pantalla de "Fin de Juego".

CAPÍTULO V: PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Pruebas de usabilidad y funcionamiento

Al tener terminado el AV del Sistema de Rehabilitación de MS se realizaron pruebas del funcionamiento del sistema con sujetos sanos para evaluar la usabilidad del sistema e identificar posibles problemas o errores. Se eligieron sujetos sanos porque se desea mejorar este prototipo antes de realizar las pruebas con sujetos que necesiten rehabilitación de MS.

Para las pruebas se eligieron 20 usuarios. Para que un usuario pudiera participar en las pruebas sólo tenía que cumplir con una característica, encontrarse entre los 26 y 60 años, ya que este rango fue el que se obtuvo al analizar las primeras encuestas aplicadas a los terapeutas, donde en este rango se encontraban la mayoría de los pacientes atendido con ACV. Para las pruebas no se consideró sexo, nivel educativo o experiencia con el uso de Entornos Virtuales.

Se elaboró un cuestionario de evaluación parecido al que se le aplicó a los terapeutas para estas pruebas. En la primera hoja de este cuestionario (Anexo 3) se presenta la explicación del proyecto de investigación, así como en qué consistirán las pruebas y los datos generales del usuario como su nombre, ocupación, edad, género y nivel educativo. También en esta hoja se aclara que toda la información recabada se resguardará y solo se utilizará para fines del proyecto.

El cuestionario está conformado de tres partes que se explican a continuación:

- **Experiencia con sistemas computacionales:** En la primera se desea obtener la experiencia del usuario con sistemas computacionales, de RV o videojuegos, así como si ha sufrido malestares al utilizar estos sistemas. Esta información nos permitirá observar si existe relación entre estas variables y su desempeño en el entorno virtual, también si existe algún tipo de malestar físico como mareos, nos permitirá observar si puede ser ocasionado por el AV o si el sujeto tiene antecedentes de sufrir estos malestares.
- **Experiencia con el Sistema de Rehabilitación desarrollado:** Esta parte se divide en cuatro tablas. La primera tabla nos permitirá conocer la experiencia del sujeto con el Sistema de Rehabilitación de una manera global, es decir del AV y del DH. En esta tabla se presenta una escala con cinco opciones que va del totalmente en desacuerdo a totalmente de acuerdo, y el usuario indicará una opción dependiendo de qué tan de acuerdo o en desacuerdo este con las afirmaciones que se presentan. De la primera afirmación a la séptima son cuestiones que se definieron para conocer la opinión del

usuario sobre la información proporcionada por el sistema, presencia de alguna molestia al utilizarlo y si le agradan las tareas y escenarios; los otros enunciados pertenecen a SUS, la cual nos permitirá observar en una escala de 0 a 100 que tan usable es el sistema para los usuarios.

La segunda tabla permite una evaluación de las cualidades pragmáticas, cualidades hedónicas y que tan atractivo es. Para la evaluación de estas cualidades se decidió utilizar el cuestionario corto o de evaluación individual, la cual consiste en diez pares de palabras. Se eligió este tipo de cuestionario por la extensión final del cuestionario de evaluación para los usuarios, si se dejaban los 28 pares de palabras del cuestionario AttrakDiff era posible que los usuarios se cansaran de contestar el cuestionario y las ultimas partes no serían tan confiables como las primeras.

Para la evaluación de este cuestionario se utilizó la herramienta que se encuentra disponible en <http://www.attrakdiff.de/>, se extrajeron los pares de palabras del cuestionario corto y se colocaron en el cuestionario impreso que se le entregó a los usuarios, sin embargo, en esta herramienta se ingresarán los datos del cuestionario físico para obtener los resultados. La herramienta se encuentra disponible y de manera gratuita desde el 2002, y desde el 2007 se ha usado por alrededor de 302 grupos de investigación (119).

La tercera tabla permite la evaluación del AV, mediante una escala de 0 a 5, donde 0 es malo y 5 es bueno. En esta tabla se encuentran preguntas que nos permite identificar algunos aspectos a mejorar como la retroalimentación detección de errores, si es fácil de aprender e intuitivo, además de observar si el usuario sintió algún malestar físico o mental. Cabe destacar que esta tabla se tiene que llenar dos veces, una con el monitor y otra con el HMD.

La última tabla permite la evaluación del DH mediante una escala de 0 a 5 donde 0 es malo y 5 es bueno. El objetivo de la tabla es poder identificar algunos aspectos que se pueden mejorar en el DH, como es la detección de errores por vibración, el control, precisión y la practicidad de este dispositivo, así como el esfuerzo físico y mental que sintieron los usuarios al manejarlo.

- **Dispositivo de visualización preferido:** En esta parte el usuario seleccionará el dispositivo de visualización (monitor o HMD) con el que se sintió más cómodo y con el cual se sintió más identificado con algunas situaciones como mayor presencia, mejor imagen o sonido y mayor interacción. Esto para conocer cuál sería el mejor instrumento para su uso en la rehabilitación. Por último, en esta parte se encuentra una pregunta

abierta donde se le pide al usuario elegir que dispositivo le gustaría utilizar si tuviera que repetir la prueba y su razón de esta elección.

La prueba consistía en dos sesiones, una con el monitor como dispositivo de visualización y otra con el HMD. Cada sesión duraba aproximadamente 40 minutos, y en cada una el sujeto iba a “jugar” cada nivel de cada escenario virtual, para poder comparar los resultados entre ambos dispositivos. Por el tiempo que duraban las sesiones se les dio la opción a los sujetos de realizar las dos sesiones el mismo día o dos días diferentes. Cabe destacar que en todas las sesiones se colocaron los componentes del Sistema de Rehabilitación en la misma posición, la cual se definió mediante diferentes pruebas en donde se cambió la ubicación del dispositivo háptico para elegir su mejor posición en donde el usuario no realice movimientos demasiados amplios; así mismo se realizaron pruebas respecto a la ubicación de la estación base del HMD, ya que dependiendo de la posición existía la posibilidad de que se perdiera el seguimiento del visor y la pantalla se volviera totalmente gris o que el usuario percibiera la sensación de caer dentro del AV. Por lo tanto, con estas pruebas se definieron distancias entre algunos componentes, aclarando que sin importar si el usuario iba a sentarse en el centro de la mesa, quedando en frente del monitor o de la estación base; la ubicación final se puede observar en el Anexo 4.

La manera en que se llevó a cabo el estudio se presenta en la Figura 64.

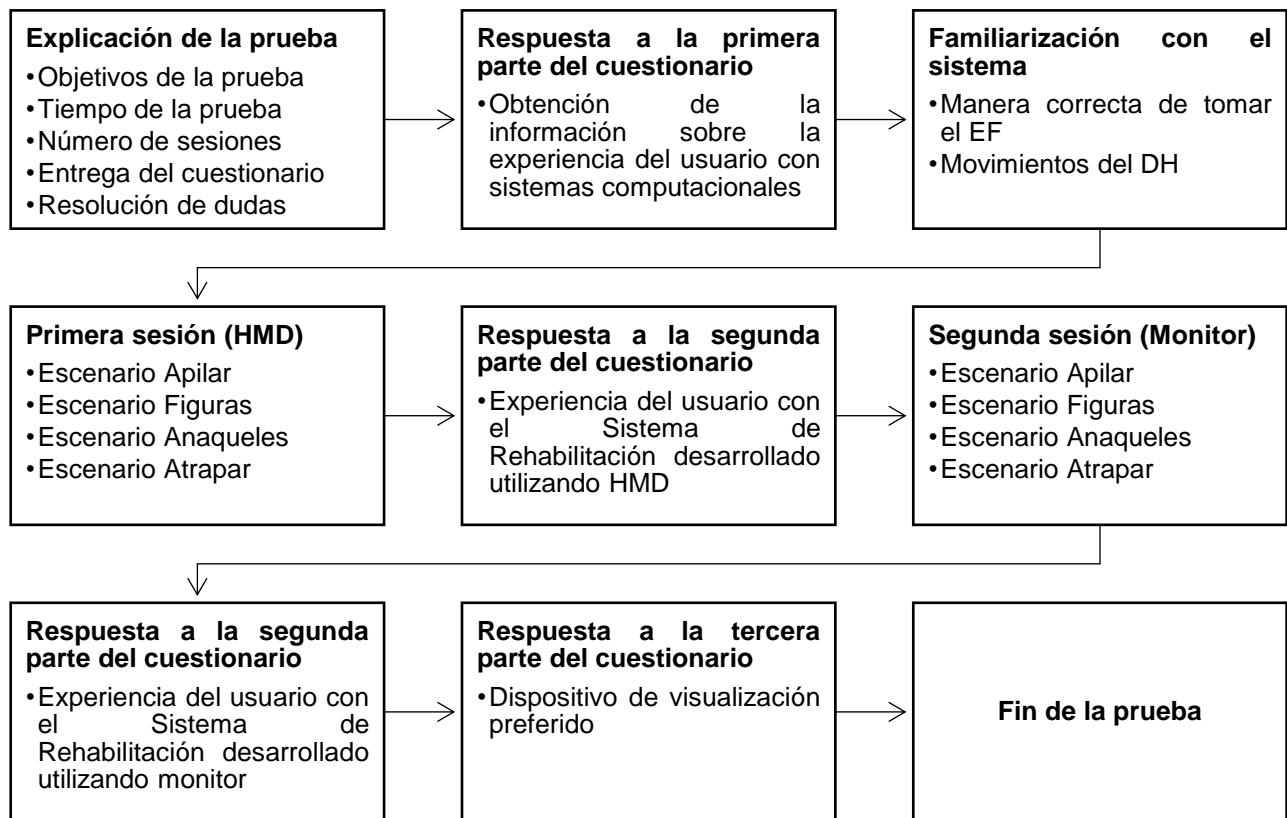


Figura 64:Diagrama sobre las fases de la evaluación.

Al llegar el sujeto se le explicó en que consistían las pruebas, el tiempo de cada sesión, porque se estaban realizando, las partes del sistema y la aplicación del cuestionario; además que en una sesión iban a visualizar los escenarios virtuales en el monitor de la laptop y que en la otra sesión iban a utilizar el HMD. Posteriormente se le entregaba el cuestionario de evaluación para que pudieran leer la primera hoja donde se explicaba todo el procedimiento de las pruebas, los problemas que se podían presentar y el tratamiento a la información recabada, si los usuarios estaban de acuerdo y daban su consentimiento tenían que colocar sus datos al final de la hoja. Si continuaban con la prueba se le explicó de manera general en qué consistía cada escenario, sus niveles y sus objetivos; al igual que los movimientos que podían realizar con el DH.

A cada participante se le dieron aproximadamente 10 minutos para que se familiarizara con el Sistema de Rehabilitación, se les dio este tiempo para que aprendieran a agarrar correctamente el EF y para que pudieran ver que movimientos podían realizar con el DH y como se veían reflejados en el AV; además de que se le pidió utilizar auriculares, que en el caso del HMD iban incluidos.

Después del tiempo de familiarización se comenzaba con el escenario de Apilar, seguido del escenario Figuras, después el escenario Anaqueles, para terminar con el escenario Atrapar. Al finalizar todos los niveles se les proporciona el cuestionario para que contesten la segunda parte, la primera tabla en la columna de la primera sesión, la segunda tabla y las dos últimas tablas se llenan con una X. Cuando terminen de llenar el cuestionario, si así lo desean se realiza la segunda sesión o se establece una fecha para ésta.

Para la segunda sesión del estudio el usuario abre su sesión y se le explica que va a realizar lo mismo que en la primera, jugar cada nivel de cada escenario, pero con el otro sistema de visualización que no había utilizado. Al finalizar se les entregaba el cuestionario para que contestaran la segunda parte, en la tabla 1 contestaran en la columna que correspondía a la segunda sesión, y en la tabla 3 y 4 colocaran un – en lugar de una X.

Al terminar de contestar la segunda parte del cuestionario después de ambas sesiones, el usuario tenía que contestar la tercera parte.

Durante las pruebas se iban tomando notas, tanto de lo que comentaban los usuarios, como algunos detalles que se observaban, como que se le dificultaba al usuario o porque se le dificultaba entender o realizar una acción.

5.2 Resultados

De los 20 participantes que se consideraron al principio se descartaron 10 usuarios, ya que dentro de las nueve primeras sesiones existieron tres ocasiones en que se rompió el mecanismo Cardán del DH, por lo tanto, se decidió cambiar de un material metálico a uno de plástico (Figura 65). El décimo usuario que se descartó fue porque tuvo problemas al contestar el cuestionario.

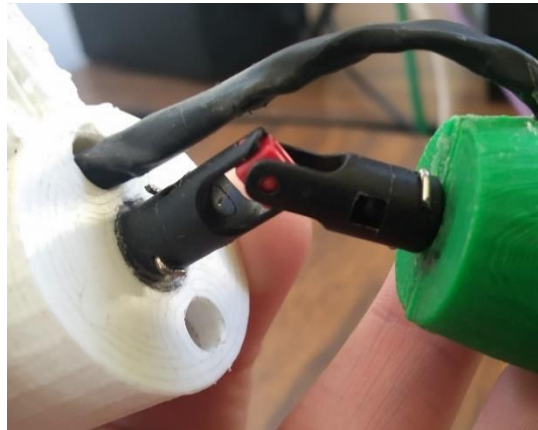


Figura 65: Mecanismo Cardán de plástico en el EF.

Así mismo el AV sufrió algunos cambios durante los primeros nueve usuarios, se decidieron realizar estos cambios para mejorar la interacción que podía tener el usuario con la interfaz, sin embargo, después de los primeros nueve usuarios no se realizó ningún cambio. Los cambios que sufrió el AV para que se obtuviera la versión final fueron:

- Se aumentó la escala en el eje Z en el juego de Apilar, ya que en este juego se detectó que era donde se rompieron algunos de los mecanismos cardán.
- Se colocó la descripción de cada nivel junto con las instrucciones del juego (Figura 62) para que el usuario entendiera lo que tenía que realizar en cada nivel.
- Se aumentó de tamaño el jugador (gancho) del escenario Apilar, ya que por su forma era difícil de visualizar para algunos usuarios.
- Se aumentó la velocidad en que avanzaba el carro de compras en el escenario Anaqueles, ya que algunos usuarios se desesperaban por la velocidad.
- La letra de la lista de compras en el modo monitor se agrandó porque algunos usuarios no podían verlas claramente.
- En la lista de compras del escenario Anaqueles se utilizaron dos colores para mostrar el nombre de los productos y la cantidad que se necesitaban colocar dentro del carro, el

color negro indicaba que faltaba por agregar ese producto y el azul indicaba que de ese producto ya no se necesitaban tomar más.

- Para los bloques en el escenario Apilar se decidió que cambiarán a otro color cuando estuvieran bien colocados, por lo tanto, eran de color verde cuando se encontraban fuera de la torre y naranjas cuando el usuario sumaba un acierto con ese bloque.

Con los 10 usuarios descartados, se obtuvo que el rango de edad de los usuarios va de los 26 a los 55 años, en cuanto al nivel educativo de los 10 usuarios finales, 2 terminaron la secundaria, 2 la preparatoria, 3 estudiaron una carrera técnica y 3 terminaron una licenciatura. 8 de los 10 usuarios tenían experiencia con el uso de computadoras de los cuales 3 pasan de 0 a 10 horas a la semana utilizando la computadora, 2 personas utilizan la computadora entre 10 y 20 horas a la semana, 1 persona la utiliza entre 20 y 30 horas, 1 persona entre 30 y 40 horas y por último una persona utiliza la computadora más de 40 horas a la semana. 7 de los 10 usuarios han jugado videojuegos, 2 de los cuales juegan diario, 1 usuario dos veces por semana y los otros 3 esporádicamente. Por último, la mitad de los usuarios han tenido alguna experiencia con la realidad virtual.

Los resultados de la escala SUS se pueden observar en la Tabla 17, en donde se muestran el valor entre 0 y 100 tanto de la prueba en donde se utilizó como dispositivo de visualización el monitor, como los resultados con el monitor.

Con estos datos podemos observar que de manera general no existe una diferencia notable si el usuario utiliza el HMD o el monitor como dispositivo de visualización, ya que, si bien se diferencia por un punto en la escala de 100, ambos se encuentran en el mismo percentil y al ser mayor de 85 puntos se puede considerar que el sistema con cualquiera de los dos sistemas de visualización tiene una usabilidad excepcional.

Por otra parte, los resultados de aplicar el cuestionario AttrakDiff se presentan a continuación. En el diagrama de pares de palabras (Figura 66) se observan las medias de los extremos de los pares de palabras.

Tabla 17: Resultados de la escala SUS con el monitor y el HMD.

Usuario	SUS	
	Monitor	HMD
1	82.5	77.5
2	82.5	82.5
3	87.5	92.5
4	92.5	92.5
5	72.5	85
6	87.5	87.5
7	92.5	92.5
8	82.5	72.5
9	80	80
10	92.5	100
Promedio	85.25	86.25
Percentil	96-100	96-100
Grado	A+	A+

En este caso podemos observar que todas se encuentran en la parte positiva del diagrama y que solo en 3 casos el valor es menor a 2, esto significaría que son aspectos a los que se pueden mejorar para que el sistema sea más usable. Es decir, para mejorar el sistema se debe hacer más práctico, debe ser más predictivo y se debe mejorar para que no se vea barato. La cualidad de que tan atractivo (ATT) es el sistema es la que obtuvo la media más alta con un 2.95, las cualidades hedónicas (HQ) le sigue con un 2.23 y las cualidades pragmáticas (PQ) con un 2.20.

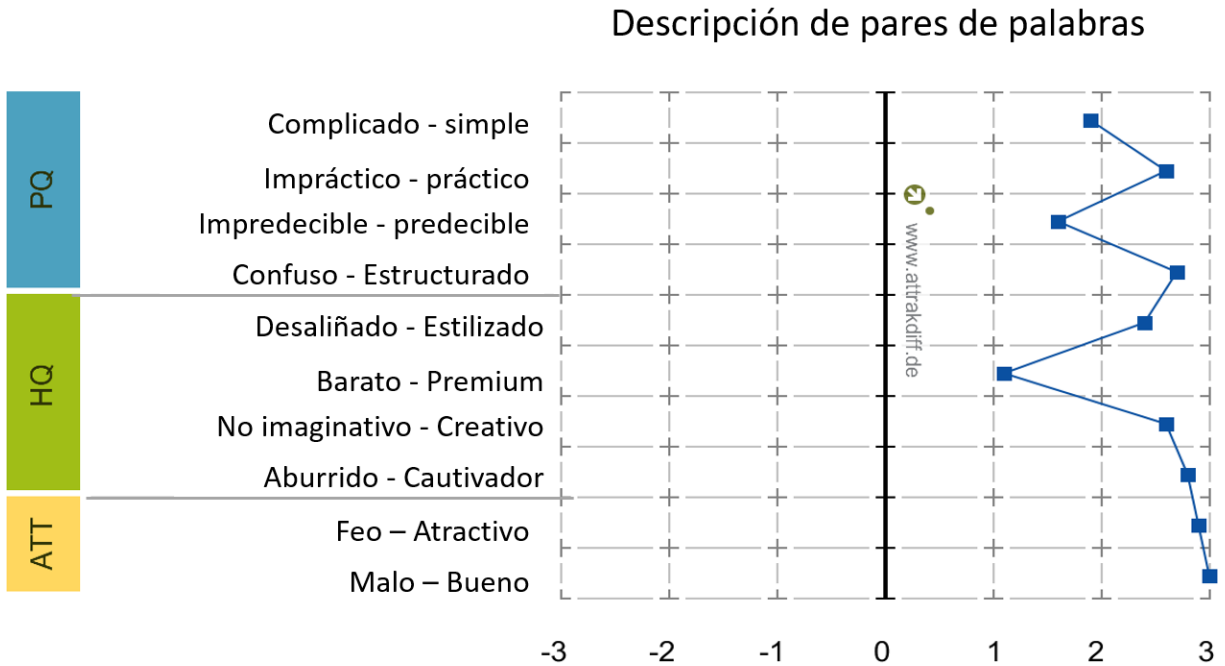


Figura 66: Diagrama de pares de la evaluación del Sistema de Rehabilitación por usuarios sanos.

Con estos valores se obtuvo el portafolio de resultados (Figura 67), donde las cualidades hedónicas se observan en el eje Y su valor más alto se encuentra del lado derecho, mientras que las pragmáticas en el eje X donde su valor más alto se encuentra en la parte superior. El valor promedio se encuentra representado con un cuadro azul fuerte, mientras que el rectángulo de confianza está representado con un color azul con transparencia, al estar representado en un mismo segmento nos permite observar que los datos pertenecen a una región y no presentan una variación representativa.

Presentación de Portafolio



Figura 67: Representación del tipo de sistema que es el Sistema de Rehabilitación según los usuarios.

Esta sección del cuestionario se realizó solo una vez para observar de manera general la percepción del usuario sobre el sistema.

Por otra parte, se realizó una evaluación específica para el DH y otra para el AV. En caso de esta sección se obtuvieron dos resultados, el primero cuando utilizó como dispositivo de visualización al monitor (Figura 68) y la segunda cuando se utilizó el HMD (Figura 69), ya que se deseaba observar si existe alguna diferencia significativa en el uso de los sistemas de visualización. Cabe destacar que, si bien fueron 10 usuarios finales, existió uno que no contestó correctamente la sesión para evaluar el AV, ya que no diferenció cuales eran para el monitor y cuales eran para el HMD, por lo tanto, solo se consideraron 9 usuarios para esta sección.

Cuando el usuario utilizó el monitor se puede observar que la mayoría de los usuarios calificaron como buena (5) cada una de las características, y que solo en la precisión de los movimientos colocaron una calificación de 4 o 3. Ninguna de las características obtuvo una calificación de 5 por parte de todos los usuarios, las características en las que se obtuvo una calificación mayor son las de sentimiento general y la rapidez de la respuesta. El sentimiento general se refiere a como se sintieron los usuarios después de haber utilizado el sistema, si sintieron tranquilidad,

curiosidad, ganas de seguir jugando se considera un sentimiento bueno, mientras si sintieron estrés, o se sintieron hartos se considera un sentimiento malo.

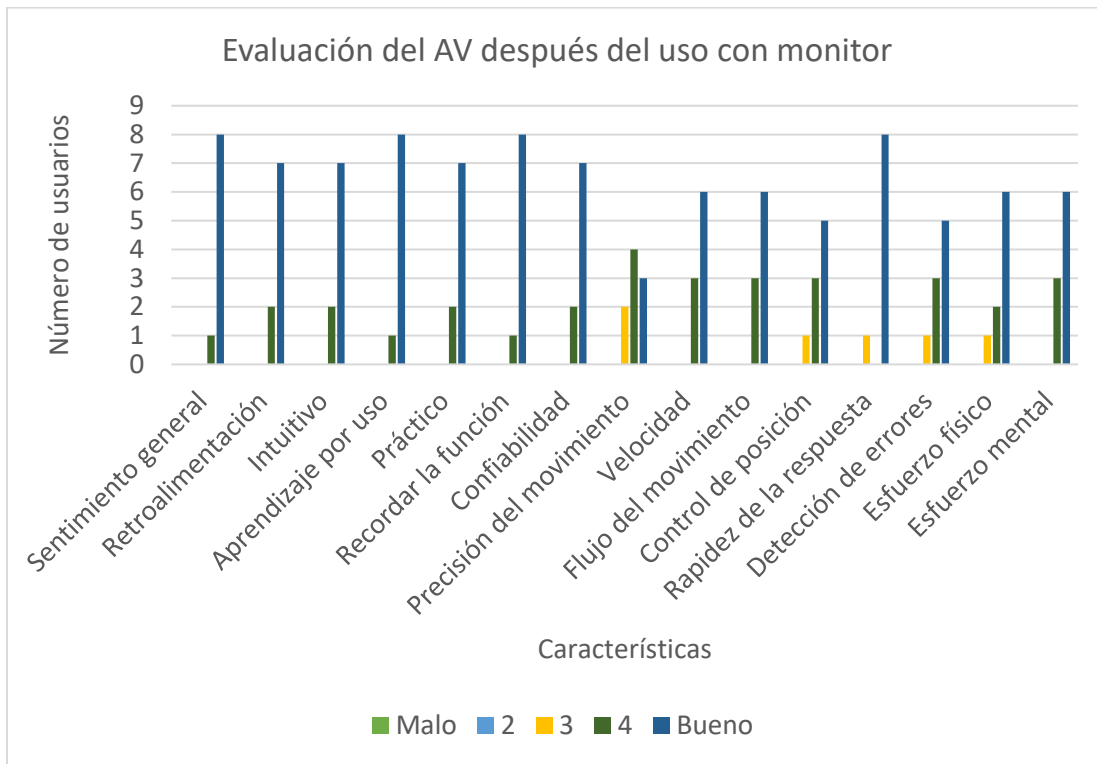


Figura 68: Evaluación del AV después de utilizar el monitor.

Por otra parte, cuando los usuarios utilizan el HMD, se puede observar un aumento en el número de usuarios que otorgaban mayor calificación a las características y en este caso la característica con menor calificación alta es la que se refiere a la detección de errores, seguida por la precisión del movimiento.

Existen algunas características en las que un mismo número de usuarios calificaron como buenas, dentro de estas se encuentran la retroalimentación, que el sistema es intuitivo, en ambos casos pudieron recordar la función de cada elemento del AV y en el caso de esfuerzo físico y detección de errores solo difieren en que en el uso del monitor obtuvieron una calificación de 3 y con el casco la mínima fue de 4.

Por otra parte, sólo una de las características sufrió una disminución al pasar del monitor al HDM, los usuarios terminaron con un mejor sentimiento general después de haber utilizado el sistema con el monitor. Mientras que las demás características sufrieron un aumento al pasar del monitor

al HMD, por lo que en algunas características todos los usuarios les dieron una calificación buena (5), como en el aprendizaje por uso y la rapidez de la respuesta.

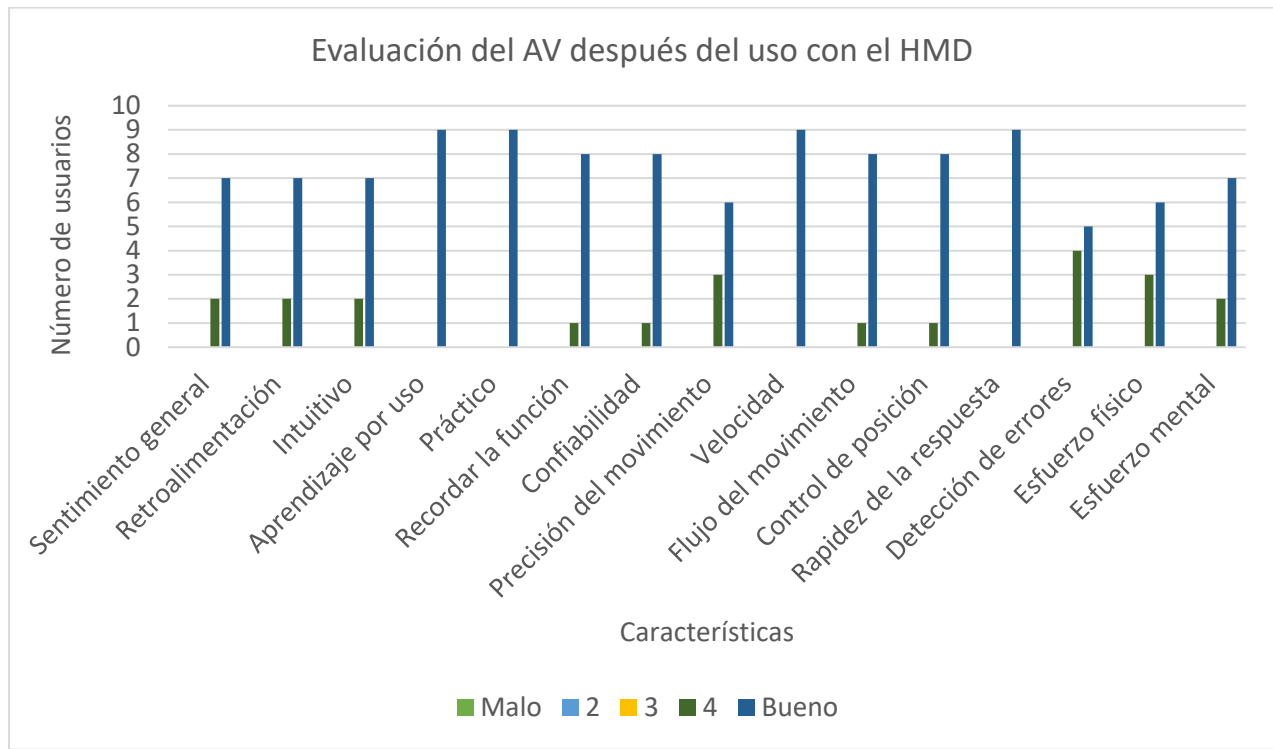


Figura 69: Evaluación del AV después de utilizar el HMD.

Para el DH, cuando se evaluó después de haber utilizado el monitor como dispositivo de visualización (Figura 70) se encontró que la característica que tiene la calificación más baja (3) es el control de la posición, seguido de la de precisión de movimiento, la cual fue la misma que en el caso del AV y después creen que el sistema limita la velocidad, sin embargo también se presentaron características en donde todos los usuarios les otorgaron la calificación más alta, como el sentimiento general, que es intuitivo y que permite aprender a utilizarlo mediante el uso.

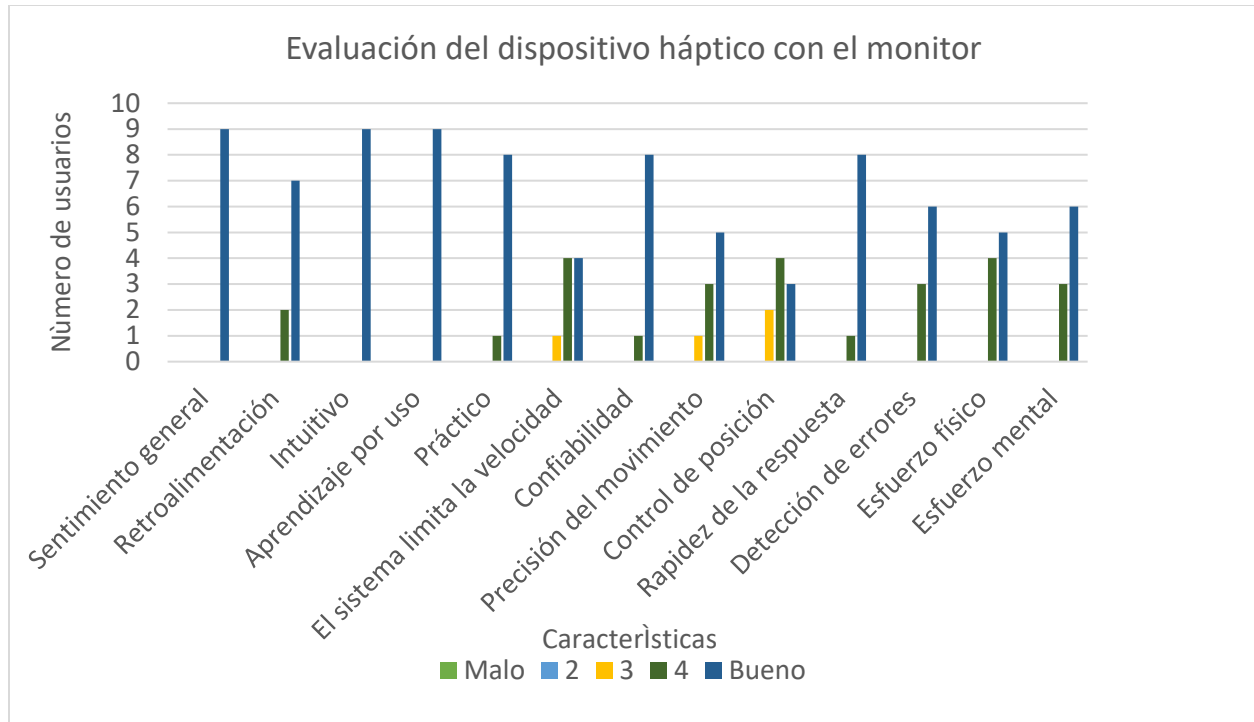


Figura 70: Evaluación de DH con el monitor.

En el caso del HMD (Figura 71), la característica con calificación más baja fue que el sistema limita la velocidad de los movimientos. En este caso se obtuvieron 7 características con la calificación más alta por parte de los usuarios y lo más relevante es que los usuarios al utilizar el HMD sintieron una diferencia en el control de la posición y en la precisión de los movimientos, subiendo su calificación de 4 y 5 respectivamente a 8, y el esfuerzo mental fue menor con este sistema de visualización debido a la inmersión que el HMD permite tener al usuario, lo que lo ayuda a ubicarse y medir distancias en el AV de una manera más precisa que con el monitor.

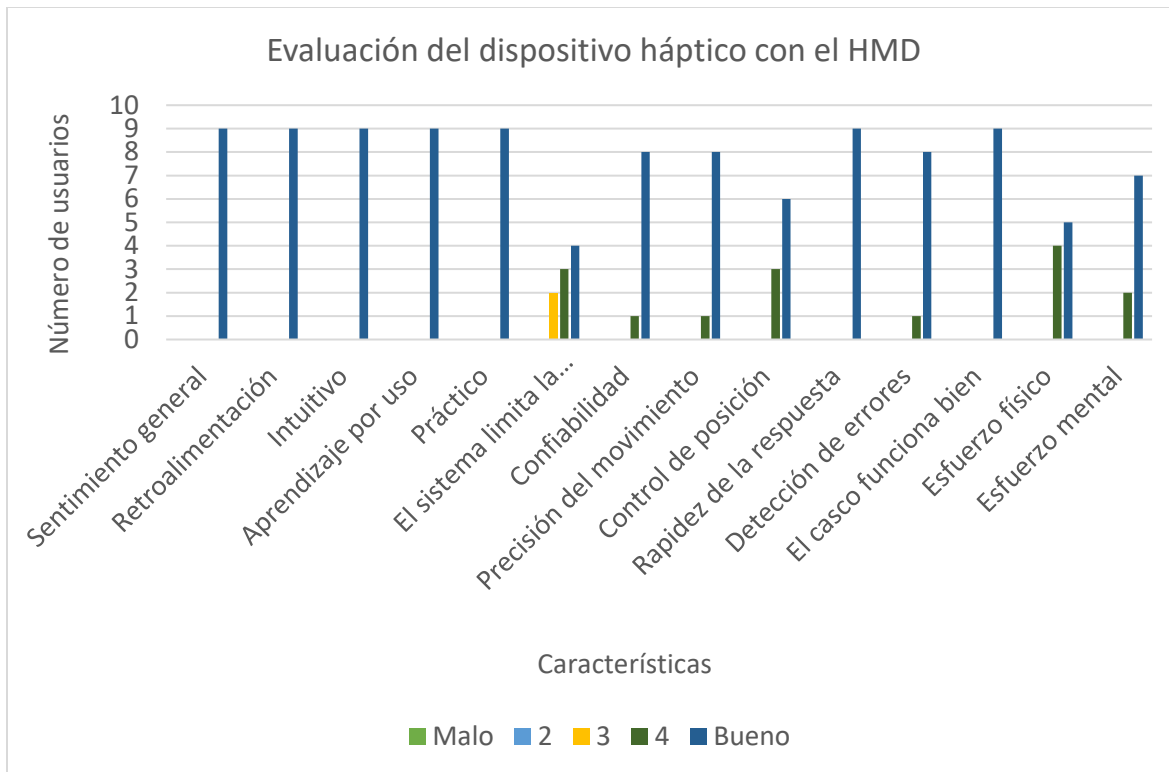


Figura 71: Evaluación del DH con el HMD como dispositivo de visualización.

Por último, estos resultados se vieron reflejados en la tercera sección, en donde se pidió comparar a ambos sistemas de visualización para ver cual cumplía con las características (Figura 72), podían elegir el HMD, monitor o ambos. En este caso las características que comparaban si la imagen era más clara o no o si tenían un mejor sonido y si tenían una sensación más clara, presentaron una persona en la que no sintió diferencia alguna entre ambos sistemas. En todas las características un mayor número de usuarios prefirieron el casco que el monitor e incluso todos los usuarios estuvieron de acuerdo. En la última parte del cuestionario se les preguntó directamente que si tuvieran que repetir la prueba y pudieran elegir el sistema de visualización con la que el que jugar ¿Cuál elegirían?, a lo cual 9 de los 10 comentaron que el HMD.

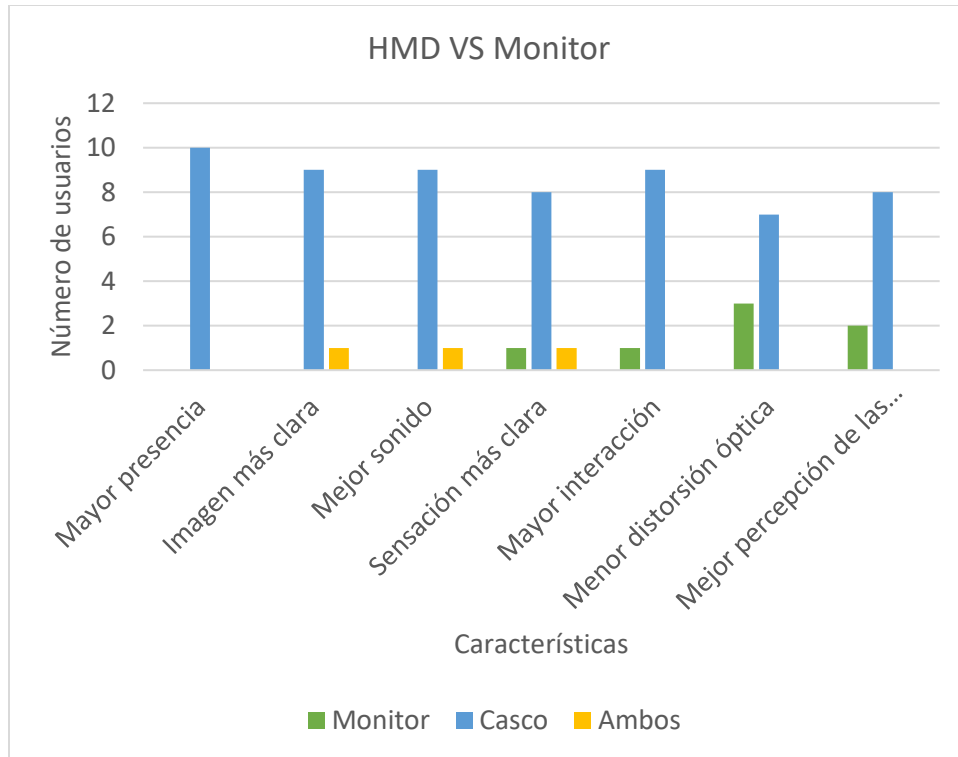


Figura 72: Comparación entre el monitor y el HMD.

Después de haber analizado los resultados de los cuestionarios aplicados se decidió analizar los datos cuantitativos que se obtuvieron de las pruebas, principalmente para observar el desempeño de los usuarios con cada sistema de visualización en cada nivel, Para esto se realizó una comparación entre el número de aciertos obtenidos en cada nivel (o el tiempo en segundos en que se obtuvieron los aciertos en el caso de algunos niveles), y se consideró que obtuvo un mejor desempeño cuando se obtuvo un mayor número de aciertos o los obtuvo en menor tiempo (Tabla 18).

Cabe destacar que no todos los usuarios lograron terminar los trece niveles, por lo que solo se consideraron aquellos niveles que se concluyeron satisfactoriamente, es por esto por lo que en la Tabla 18 se observan algunos espacios vacíos.

Tabla 18: Desempeño de los usuarios en cada uno de los 13 niveles.

Usuario		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Figuras Contrarreloj (Acieros)	Monitor	26	19	20	18	12	30	34	28	20	27	
	HMD	18	24	16	19	4	35	40	21	36	42	
Figuras Nivel 1 (Tiempo)	Monitor	73	127	142	185	283	40	68	47	172	85	
	HMD	61	49	41	213	182	63	39	77	123	129	
Figuras Nivel 2 (Tiempo)	Monitor	62	75	172	118	222	-----	87	50	192	96	
	HMD	72	80	80	161	204	-----	123	120	153	147	
Anaqueles Nivel 1 (Tiempo)	Monitor	487	753	101	254	242	145	109	-----	-----	268	
	HMD	175	588	44	162	573	204	152	-----	-----	143	
Anaqueles Nivel 2 (Tiempo)	Monitor	363	529	222	123	792	54	122.	-----	-----	286	
	HMD	214	800	65	325	804	152	343	-----	-----	205	
Anaqueles Nivel 3 (Tiempo)	Monitor	-----	-----	-----	158	-----	-	126	227	-----	-----	230
	HMD	-----	-----	-----	356	-----	-	250	232	-----	-----	155
Apilar Nivel 1 (Tiempo)	Monitor	87	133	136	100	90	127	110	51	78	130	
	HMD	55	191	281	80	195	261	63	90	87	47	
Apilar Nivel 2 (Tiempo)	Monitor	218	535	125	187	128	69	265	80	96	-----	
	HMD	77	242	280	152	176	73	73	102	183	-----	
Apilar Nivel 3 (Tiempo)	Monitor	477	358	193	117	93	86	183	123	137	-----	
	HMD	1173	221	271	83	313	46	73	90	93.	-----	
Atrapar Nivel 1 (Tiempo)	Monitor	67	86	19	-----	85	36	162	34	132	132	
	HMD	48	85	47	-----	191	26	48	85	77	164	
Atrapar Nivel 2 (Tiempo)	Monitor	47	1174	1306	-----	2266	1115	1737	143	123	138	
	HMD	1224	2838	48	-----	3294	1643	1583	125	141	160	
Atrapar Nivel 3 (Tiempo)	Monitor	47	-----	1188	215	2285	1060	1720	132	79	154	
	HMD	1173	-----	66	236	3042	1394	1557	123	29	231	
Atrapar Nivel 4 (Acieros)	Monitor	230	-----	-----	57	7	7	2	26	28	6	
	HMD	118	-----	-----	157	15	13	103	32	30	16	

Al tener el desempeño de cada nivel se contabilizaron tanto los niveles en que el usuario había tenido un mejor desempeño con el HMD como en los que presentó un mejor desempeño con el monitor (Figura 73). Se comparó el número de niveles en el que se tuvo un mejor desempeño con cierto sistema de visualización y el que fuera mayor se seleccionó como el sistema con mejor desempeño del usuario.

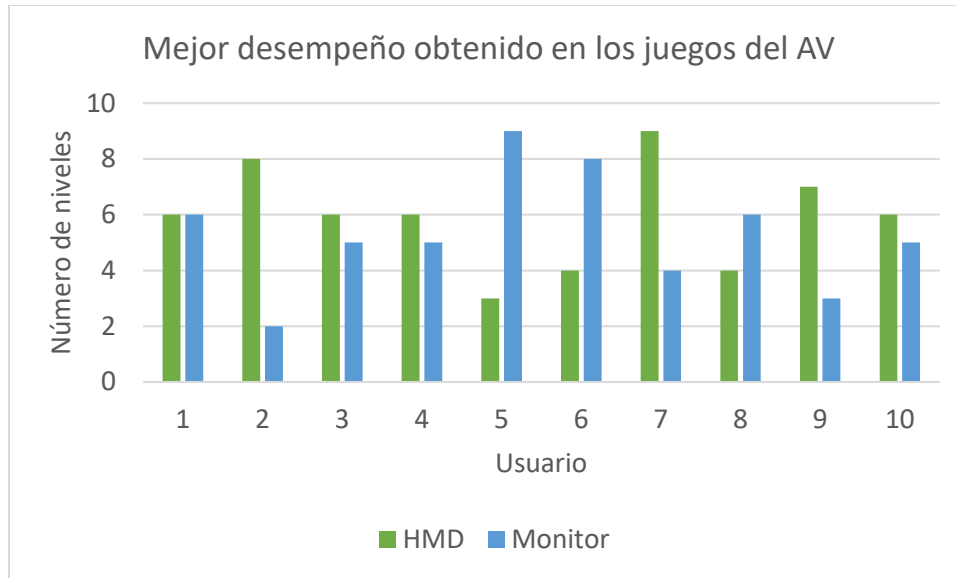


Figura 73: Mejor desempeño obtenido en los juegos del AV.

Con estos datos también se obtuvo la Tabla 19, donde muestra el número de usuario, con qué sistema de visualización tuvo mejor desempeño, su género y escolaridad y si ha utilizado la computadora, videojuegos o RV.

Tabla 19: Desempeño y características de los usuarios.

Usuario	Mejor desempeño	Genero	Escolaridad	Uso de la computadora	Uso de videojuegos	Uso de RV
1	Igual	F	Carrera técnica	Sí	No	No
2	HMD	M	Carrera técnica	No	No	Sí
3	HMD	M	Licenciatura	Sí	Sí	Sí
4	HMD	M	Secundaria	Sí	Sí	No
5	Monitor	M	Secundaria	Sí	Sí	No
6	HMD	M	Preparatoria	Sí	No	No
7	Monitor	M	Licenciatura	Sí	Sí	Sí
8	Monitor	M	Licenciatura	Sí	Sí	Sí
9	HMD	M	Secundaria	No	Sí	No
10	HMD	M	Carrera técnica	Sí	Sí	Sí

En total 3 usuarios de los 10 tuvieron un mejor desempeño con el monitor que con el HMD, siendo uno de estos usuarios el que eligió mejor dispositivo de visualización al monitor, mientras que los otros dos eligieron al HMD.

Durante las pruebas se identificaron y comentaron algunas cuestiones a mejorar, las cuales se mencionan a continuación:

- El juego debe comenzar cuando el usuario coloque el EF a la altura de la mesa y apriete el botón, lo cual esta detallado en las instrucciones de los escenarios, sin embargo, los usuarios no las leen por lo que es necesario que el tiempo no comience a transcurrir hasta que el AV detecte que el EF se encuentre en cierta posición.
- El motor vibra al chocar con cualquier objeto virtual, lo que provoca que esto no sea un indicador para saber si el usuario logrará un acierto o no. Para mejorar esto es necesario limitar la vibración a situaciones que conlleven a un acierto o a un error.

5.3 Discusión de resultados

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior en un Ambiente Virtual para la recuperación de la movilidad.

En cuanto al puntaje de la usabilidad del sistema con el monitor como sistema de visualización mejoró respecto a la primera evaluación, pasando de un puntaje de 78 a uno de 85.25 en una escala de 100. Con este aumento en el puntaje se puede observar un cambio significativo ya que calificando el sistema con grados pasamos de un grado B+ a un A+, aumentando la calificación del sistema en dos grados. En cuanto a la evaluación de la experiencia de usuario mediante el cuestionario AttrakDiff se observó un cambio en el promedio del puntaje en todas las cualidades del sistema, ya que en las pragmáticas se pasó de un puntaje de 1.25 a uno de 2.2, la atracción del sistema pasó de un 1.3 a un puntaje de 2.95 y por último las cualidades hedónicas pasaron de un puntaje de 0.6 a uno de 2.23, por lo que se observó un aumento considerable en las tres cualidades, lo que se vio reflejado en la descripción del sistema, de un sistema orientado a la tarea (Figura 48) a un sistema deseado (Figura 67).

Estos cambios en el puntaje de la usabilidad pueden haberse dado en primera instancia por las mejoras que se realizaron en el sistema ya que se logró tener un AV donde es más fácil entender los elementos que comprenden a cada escenario, así como cuando se obtiene un acierto o cuando se está errando. También existe la posibilidad de que por la experiencia de los terapeutas saben o tienen una idea más específica sobre lo que requiere una persona con problemas de movilidad en el MS a comparación de los usuarios sanos que realmente no presentan ninguna dificultad (más que el desconocimiento del sistema) para poder realizar las tareas, otra diferencia que se pudo reflejar en estos puntajes es que los terapeutas visualizan el sistema dentro de su

entorno clínico para poder cumplir con tareas que ellos ya realizan, mientras que los usuarios sanos, aunque se les explicó el objetivo del proyecto, pudieron no visualizar el sistema en un ambiente diferente al de las pruebas.

Por otra parte, en los resultados de la segunda evaluación respecto al sistema de visualización que los usuarios utilizaron en las pruebas, se observa una preferencia al uso del HMD, ya que 9 de los 10 usuarios mencionaron que si tuvieran que realizar otra sesión con el sistema de rehabilitación preferirían utilizar el HMD, así mismo se observó que tuvieron una sensación más clara dentro de los entornos, gracias al sonido, imagen, la presencia y la interacción cuando utilizaron este sistema de visualización.

También en la evaluación del AV se observó un mayor puntaje en las diferentes características (velocidad, precisión del movimiento, esfuerzo mental y físico) cuando se utilizó el HMD (Figura 69), aunque el AV presentado en ambas sesiones (HMD y monitor) fuera exactamente el mismo. Lo que representa que el sistema de visualización utilizado influye en la calidad y el funcionamiento del AV; una de las características en las que más se observó la diferencia fue en la precisión del movimiento, y el control de la posición, lo cual puede estar relacionado con que el uso del HMD permite tener una mayor percepción de las distancias entre los objetos.

El mismo comportamiento se observó en la evaluación del DH, donde las características que lo evaluaban (detección de errores, confiabilidad, rapidez de la respuesta) reflejaron un mayor puntaje al utilizar el HMD (Figura 71) aunque el DH fuera exactamente el mismo con ambos sistemas de visualización. Lo cual significa que existe una diferencia en la percepción del AV y del DH de acuerdo al Sistema de visualización que se utiliza, teniendo una mejor percepción del funcionamiento del DH, ya que se observó una mejora en el control de la posición, así como en la detección de errores y en el esfuerzo mental, aunque existieron características como el esfuerzo físico o que el sistema limita la velocidad que disminuyó, esto pudo estar relacionado a que los usuarios al usar el HMD no eran capaces de ver el DH y su posición real, por lo que los movimientos los realizaban con mayor seguridad y solo concentrándose en el AV, no en los objetos que los rodeaban, mientras que con el monitor estaban al pendiente de los movimientos que realiza el DH no solo el EF, así como de la mesa y los objetos a su alrededor.

Finalmente se obtuvo el desempeño de los usuarios en cada nivel con cada dispositivo de visualización, y se obtuvo el número de niveles en los que se obtuvo un mejor desempeño utilizando el monitor y el número de niveles en los que se obtuvo mejor desempeño utilizando el

HMD, finalmente se compararon estos números y se eligió el sistema con mejor desempeño aquel que tuviera el mayor número de niveles. Con estos datos se obtuvo que 3 de los 10 usuarios obtuvieron un mejor desempeño con el monitor, uno de los cuales eligió el monitor como sistema de visualización si tuviera que repetir la prueba, mientras que los otros dos eligieron el HMD, es decir ellos sintieron que el HMD era mejor que el monitor, pero tuvieron un mejor desempeño con el monitor, así mismo se observa que tres de los diez usuarios solo obtuvieron un mejor desempeño con el HMD por uno de los 13 niveles (Figura 73) por lo que la diferencia no es significativa.

Durante las pruebas se pudo observar que los usuarios mejoraban su desempeño cuando entendían los objetivos del juego, por ejemplo, el escenario “Anaqueles” fue el juego en el que existió mayor confusión, ya que muchas veces los usuarios no leen las instrucciones por lo que no entendían que es lo que tenían que hacer y como interactuar con los diferentes elementos del juego.

Con la observación anterior y con los resultados del desempeño de los usuarios nos permiten preguntarnos sobre la necesidad del uso del HMD, ya que si bien se entiende que este permite una mayor inmersión y una mejor visualización de las distancias entre los objetos virtuales, no refleja una mejora significativa en el desempeño de los usuarios y puede ser que esta mejora sea un reflejo del aprendizaje del usuario para utilizar el sistema, sus elementos y comprender los objetivos de cada nivel de cada escenario virtual. Si este fuera el caso, el sistema de visualización no afectaría en la rehabilitación del paciente, lo que permitiría usar solamente el monitor, convirtiendo al sistema en un sistema de bajo costo que sería fácil de adquirir en cualquier centro de rehabilitación.

El sistema propuesto tiene la ventaja de estar diseñado específicamente para la rehabilitación de miembro superior mediante el seguimiento de los movimientos de esta parte del cuerpo dentro de un espacio tridimensional, así mismo los materiales y herramientas que se utilizaron para su construcción y diseño son de bajo costo cuando se utiliza el monitor, por lo que permitiría su implementación en entornos clínicos donde no se tenga suficiente presupuesto económico.

Otra ventaja por mencionar es que el sistema está programado para que se pueda rehabilitar cualquier lado del cuerpo, es decir, se puede utilizar tanto con el brazo izquierdo como con el derecho con las mismas actividades y los mismos niveles, lo único que se tiene que modificar es la posición del dispositivo háptico, el cual se ubicará del lado a rehabilitar.

El sistema fue desarrollado con la retroalimentación obtenida por parte de terapeutas, por lo que el diseño se realizó de acuerdo con las necesidades de los terapeutas en su entorno clínico y características que ellos consideran útiles como el uso de escalas clínicas, lo que se puede considerar una ventaja, ya que si el terapeuta se siente cómodo con el sistema es más probable que lo utilicen.

CONCLUSIONES

En este documento se realizó la descripción del desarrollo y evaluación de un sistema de rehabilitación que se construyó con la ayuda de la retroalimentación de terapeutas. El sistema permite realizar los movimientos que se utilizan en la rehabilitación tradicional, así como monitorear el desempeño del paciente a lo largo de sus sesiones de terapia, lo que permite su inclusión dentro de un entorno clínico.

En base a la versión final del sistema y a los resultados obtenidos se puede concluir que el objetivo general del proyecto se cumplió, ya que se logró desarrollar el sistema de rehabilitación de miembro superior conformado por un dispositivo háptico y un AV para la recuperación de la movilidad para personas que han sufrido un ACV o alguna fractura.

Se logró identificar los ejercicios que los pacientes realizan en la terapia convencional y que se pueden replicar con el DH y en el AV mediante cuestionarios que terapeutas contestaron y con la retroalimentación continua de ellos. Además, se identificaron parámetros que caracterizan el desempeño de los pacientes durante sus terapias como el rango de movimiento y el grado de independencia de los pacientes; se identificaron escalas clínicas que los terapeutas utilizan en su trabajo y que son útiles al integrarlas en el AV, así mismo con las encuestas se observaron otros parámetros que no se utilizan normalmente en la terapia pero que pueden ser indicadores para los terapeutas, como el tiempo trayectoria, velocidad y el número de aciertos.

Se diseñó y programó el AV que consiste en una interfaz de usuario y de cuatro escenarios virtuales, para los cuales se definieron los niveles de acuerdo con la retroalimentación de los terapeutas, tanto del primer cuestionario como de la primera evaluación que se realizó.

Se integró el dispositivo háptico con el AV mediante la comunicación UDP implementada en un modelo Simulink® llamado "Host", del cual se obtuvo un archivo ejecutable (.exe) que se integró al AV y se ejecuta en segundo plano sin la intervención del usuario (terapeuta o paciente), esto permitió que los movimientos del DH con el AV fueran rápidos y fluidos de forma natural.

Con la evaluación de la usabilidad y del funcionamiento del Sistema de Rehabilitación nos permitieron observar una mejora entre la primera y la tercera versión y junto con los resultados del desempeño y su relación con el sistema de visualización, se puede concluir que el sistema se puede utilizar con HMD o solo con monitor ya que no se observó una diferencia significativa en el desempeño de los usuarios y en la usabilidad al utilizar el HMD o el monitor.

Por otra parte, con los cuestionarios AttrakDiff también se logró notar una diferencia significativa entre la primera y la tercera versión del AV, ya que pasó de ser un sistema impredecible y “barato” a considerarse un sistema que tiene un atractivo hacía los usuarios, así mismo cumple con las características hedónicas y pragmáticas necesarias para considerarse un sistema deseado.

Para observar el funcionamiento y usabilidad del sistema con pacientes, se tienen que realizar pruebas a personal especializado (terapeutas) y personas que necesitan la rehabilitación en el miembro superior, las cuales se podrán realizar después de efectuar las modificaciones necesarias sobre los detalles detectados en la segunda evaluación (página 111).

Así mismo como trabajo futuro se desea probar el sistema de rehabilitación y validar su eficacia en un entorno clínico, demostrando si existen diferencias clínicamente significativas al utilizarlo en comparación a la terapia tradicional.

IMPLICACIONES ÉTICAS

El proyecto se diseñará de tal manera que sea capaz de cumplir con los criterios para ser usado en un estudio clínico, por lo tanto, se presentan las implicaciones éticas bajo esta premisa.

De acuerdo con los principios establecidos en la Declaración de Helsinki promulgada por la Asociación Mundial Médica en 1964 y en el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la salud, en su Título Segundo, que establece los aspectos éticos de investigación en seres humanos, Capítulo 1, artículo 17; esta investigación está considerada como una investigación de Riesgo mínimo, por lo que este proyecto se desarrollará bajo los siguientes criterios:

En México las enfermedades cerebrovasculares se consideran como un problema de salud pública de orden prioritario (12), actualmente se considera que cada año aumentan 43,000 los discapacitados por secuelas del accidente cerebrovascular (ACV) (120). Muchas veces, en las terapias tradicionales es difícil para los pacientes observar sus avances, lo que provoca que abandonen la terapia; otras razones para la deserción en que los ejercicios les pueden parecer monótonos y aburridos, disminuyendo su interés y, por lo tanto, su motivación (6,7). Con la presente investigación se desea desarrollar un sistema de rehabilitación constituido de un ambiente virtual y un sistema háptico que permita motivar a los pacientes para que puedan concluir su terapia exitosamente y ser capaces de realizar sus actividades con independencia. Así mismo el sistema será una ayuda para los terapeutas, ya que este les proporcionará parámetros que les ayuden a observar el progreso del paciente.

En la literatura encontramos diversos artículos donde se han realizado estudios similares como en (121) donde se observó que la terapia con realidad virtual (RV) es segura y aceptada por los pacientes; así mismo en (122) se realizó un estudio, donde se observó que con un sistema háptico y con RV se pueden obtener mediciones clínicamente importantes, ya que permitiría planear una terapia personalizada enfocándose en las necesidades e impedimentos de cada paciente.

Ya que se han realizado diversos estudios similares, es imposible obtener los resultados deseados con simulaciones, ya que uno de los objetivos es medir si existe alguna diferencia en la motivación de los pacientes que reciben rehabilitación tradicional con los pacientes que reciben rehabilitación con el sistema háptico. Sin embargo, el paciente tendrá la libertad de dejar el estudio en el momento en que lo desee.

Dentro de los riesgos que se encuentran en el estudio son que con el sistema de rehabilitación no se obtengan los resultados deseados (progreso del paciente) en el tiempo en el que se hubieran obtenido con terapia tradicional y que el paciente sienta algún mareo o tenga alguna molestia por el ambiente virtual; sin embargo, todas las pruebas estarán supervisadas por un terapeuta, quien al observar que este estudio puede ocasionar algún daño al paciente, informará al equipo de investigación para detener los estudios.

Para realizar el estudio se le entregará un consentimiento informado a cada participante. Durante la entrega se le explicará a la persona el proyecto, así como se responderán todas sus dudas.

Cabe destacar que esta investigación sólo se llevará a cabo cuando se obtenga las autorizaciones necesarias de los centros de rehabilitación donde se realicen las pruebas y el consentimiento informado de cada uno de los participantes.

Con esta información se realizó un protocolo para entregar al Comité de Ética en Investigación de la Facultad de Medicina, el cual se entregó y se obtuvo la aprobación del protocolo de investigación por parte del Comité (Anexo 5) El protocolo no se anexó a este documento ya que no se llevó a cabo.

BIBLIOGRAFÍA

1. OMS. Informe mundial sobre la discapacidad (2011) [Internet]. Organización Mundial de la Salud. Malta; 2011. Disponible en: http://www.who.int/entity/disabilities/world_report/2011/accessible_es.pdf?ua=1. INEGI. Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica ENADID 2018. 2018.
2. Guidali M, Duschau-Wicke A, Broggi S, Klamroth-Marganska V, Nef T, Riener R. A robotic system to train activities of daily living in a virtual environment. *Med Biol Eng Comput*. 2011; 49(10): 1213–1223.
4. Riener R, Harders M. *Virtual Reality in Medicine*. London: Springer London; 2012.
5. Robertson J., Roby B. Augmented feedback, virtual reality and robotics for designing new rehabilitation methods. En: Didier J-P, Bigand E, editores. *Rethinking physical and rehabilitation medicine*. Paris: Springer; 2010. p. 223–255.
6. Saposnik G. *Virtual Reality in Stroke Rehabilitation*. En: Ovbiagele B, Turan T, editors. *Ischemic Stroke Therapeutics*. Springer; 2016. p. 225–323.
7. Han J, Lian S, Guo B, Li X, You A. Active rehabilitation training system for upper limb based on virtual reality. *Adv Mech Eng*. 2017; 9(12): 1–12.
8. Híjar MC. Los accidentes como problema de salud pública en México [Internet]. Academia Nacional de Medicina. 2014. 268 p. Disponible en: <https://www.anmm.org.mx/publicaciones/CAnivANM150/L9-Los-accidentes-como-problema-salud-publica.pdf>
9. Jafari N, Adams KD, Tavakoli M. Haptics to improve task performance in people with disabilities: A review of previous studies and a guide to future research with children with disabilities. *J Rehabil Assist Technol Eng*. 2016; 3.
10. O’Neil O, Gatzidis C, Swain I. A State of the Art Survey in the Use of Video Games for Upper Limb Stroke Rehabilitation. En: Ma M, Jain LC, Anderson P, editores. *Augmented Reality and Serious Games for Healthcare 1*. Berlín: Springer; 2014. p. 345–370.
11. Reddy D, Hart R. Stroke Epidemiology, Etiology, and Background. En: Schweizer TA, Macdonald RL, editores. *The Behavioral Consequences of Stroke*. Nueva York: Springer; 2014. p. 1–14.
12. Sociedad Mexicana de Radiología e imagen. *La enfermedad vascular cerebral en México :*

un problema de salud en incremento Cerebrovascular disease in Mexico : a growing health problem. *An Radiol México*. 2015; 14: 243–244.

13. Merians AS, Fluet GG, Qiu Q, Saleh S, Lafond I, Davidow A, et al. Robotically facilitated virtual rehabilitation of arm transport integrated with finger movement in persons with hemiparesis. *J Neuroeng Rehabil*. 2011; 8(27): 1–10.
14. Ibarra L, & cols. *Las Enfermedades Y Traumatismos Del Sistema Músculo Esquelético. Un Análisis Del Instituto Nacional De Rehabilitación De México, Como Base Para Su Clasificación Y Prevención*. Secr Salud. 2013; 148.
15. INEGI. *La discapacidad en México, datos al 2014* [Internet]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes; 2016. Disponible en: http://conadis.gob.mx/gob.mx/transparencia/transparencia_focalizada/La_Discapacidad_en_Mexico_datos_2014.pdfhttp://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825090203.pdf
16. Kasper D, Fauci A, Hauser S, Longo D, Jameson J, Loscalzo J. Apoplejía. En: Dennis L. Kasper, Anthony S. Fauci, Stephen L. Hauser, Dan L. Longo, J. Larry Jameson JL, editor. *Harrison Manual de Medicina Interna*. 19th ed. Ciudad de México: Mc Graw Hill; 2016. p. 82–91.
17. Hall J, Guyton A. *Tratado de fisiología médica*. 12th ed. Mississippi: Elsevier Saunders.
18. Bhalla A, Birns J. *Management of Post-Stroke Complications*. Bhalla A, Birns J, editores. Nueva York: Springer; 2015. 1–10 p.
19. Guiu-Tula FX, Cabanas-Valdés R, Sitjà-Rabert M, Urrútia G, Gómara-Toldrà N. The Efficacy of the proprioceptive neuromuscular facilitation (PNF) approach in stroke rehabilitation to improve basic activities of daily living and quality of life: A systematic review and meta-analysis protocol. *BMJ Open*. 2017; 7(12): 1–5.
20. Martin SC, Kessler M. *Neurologic Interventions for Physical Therapy*. 3rd ed. St. Louis: Elsevier; 2016. 249–299, 300–367 p.
21. Hsieh Y-W, Liing R-J, Lin K-C, Wu C-Y, Liou T-H, Lin J-C, et al. Sequencing bilateral robot-assisted arm therapy and constraint-induced therapy improves reach to press and trunk kinematics in patients with stroke. *J Neuroeng Rehabil*. 2016; 13(1): 1–9.
22. Asín Prieto G, Cano-de-la-Cuerda R, López-Larraz E, Metrot J, Molinari M, van Dokkum

- LEH. Emerging perspectives in stroke rehabilitation. En: Pons J, Torricelli D, editores. *Emerging Therapies in Neurorehabilitation*. 4th ed. Madrid: Springer; 2014. p. 3–21.
23. Cioni G, Sgandurra G, Muzzini S, Paolicelli P., Ferrari A. Forms of Hemiplegia. En: Ferrari A, Ciolini G, editores. *The spastic Forms of Cerebral Palsy*. Pisa: Springer; 2010. p. 331–356.
 24. Faria AL, Andrade A, Soares L, I Badia SB. Benefits of virtual reality based cognitive rehabilitation through simulated activities of daily living: a randomized controlled trial with stroke patients. *J Neuroeng Rehabil*. 2016; 13(1): 1–12.
 25. Faria AL, Cameirão MS, Couras JF, Aguiar JRO, Costa GM, Bermúdez i Badia S. Combined cognitive-motor rehabilitation in virtual reality improves motor outcomes in chronic stroke - A pilot study. *Front Psychol*. 2018; 9(MAY): 1–13.
 26. Quemada J, Marín J MJ. La medida de la salud en rehabilitación. En: Sánchez I, Ferrero A, Aguilar J, Climent J, Conejero J, Flórez M, et al., editores. *Manual SERMEF de rehabilitación y medicina física*. Madrid: Médica panamericana; 2006. p. 592.
 27. Basteris A, Nijenhuis SM, Stienen AHA, Buurke JH, Prange GB, Amirabdollahian F. Training modalities in robot-mediated upper limb rehabilitation in stroke: A framework for classification based on a systematic review. *J Neuroeng Rehabil*. 2014; 11(111): 1–15.
 28. Gangoiti L. Recursos asistenciales de atención a personas con daño cerebral. El equipo multiprofesional. En: Polonio López, B. RAD, editor. *Terapia ocupacional aplicada al daño cerebral adquirido*. Madrid: Médica panamericana; 2017. p. 33.
 29. Widmer M, Held JP, Wittmann F, Lamercy O, Lutz K, Luft A. Does motivation matter in upper-limb rehabilitation after stroke? ArmeoSenso-Reward: Study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*. 2017; 18(1): 1–9.
 30. Levine PG. Recovery Strategies. En: Levine PG, editor. *“Stronger After Stroke, Second Edition”: Your Roadmap to Recovery* [Internet]. 2nd ed. Demos Health; 2013. p. 131–74. Disponible en: <https://books.google.co.id/books?id=Lg94dNQ0KsoC>
 31. Reis A, Lains J, Paredes H, Filipe V, Abrantes C, Ferreira F, et al. Developing a system for post-stroke rehabilitation: An exergames approach. En: *19th International Conference on Human-Computer Interaction*. Vancouver: Springer; 2017. p. 403–413.
 32. Widmer M, Ziegler N, Held J, Luft A, Lutz K. Rewarding feedback promotes motor skill

- consolidation via striatal activity. En: Studer B, Knecht S, editores. Progress in Brain Research. Amsterdam: Elsevier B.V.; 2016. p. 303–23.
33. Simonetti D, Zollo L, Papaleo E, Carpino G, Guglielmelli E. Multimodal adaptive interfaces for 3D robot-mediated upper limb neuro-rehabilitation: An overview of bio-cooperative systems. *Rob Auton Syst.* 2016; 85: 62–72.
 34. Monteagudo de la Rosa M. Manual CTO de Medicina y Cirugía. Madrid: Grupo CTO; 2014.
 35. Silberman F, Varaona O. Ortopedia y Traumatología. 2nd ed. Editorial Médica Panamericana; ; 2010. 480 p.
 36. Dandy D, Edwards D. Ortopedia y traumatología. México: Manual Moderno; 2011.
 37. Schwickert L, Klenk J, Stähler A, Becker C, Lindemann U. Robotic-assisted rehabilitation of proximal humerus fractures in virtual environments. *Z Gerontol Geriatr.* 2011; (44): 387–392.
 38. Bruder A, Taylor NF, Dodd KJ, Shields N. Exercise reduces impairment and improves activity in people after some upper limb fractures : a systematic review. *J Physiother.* 2011; 57(2): 71–82.
 39. Hoppenfeld S, Murthy V. Treatment and Rehabilitation of Fractures. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2000.
 40. Padilla- Castañeda MA, Sotgiu E, Frisoli A, Bergamasco M, Orsini P, Martiradonna A, et al. A Virtual Reality System for Robotic-Assisted Orthopedic Rehabilitation of Forearm and Elbow Fractures. En: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Tokyo: IEEE; 2013. p. 1506–11.
 41. Ordóñez ZY, Luna CA, Rengifo CF. Herramienta de Entrenamiento Virtual en 2-D para Rehabilitación de Motricidad Fina en Miembro Superior con Incorporación de un Dispositivo Háptico (software para rehabilitación fina en miembro superior). *Rev Ing Biomédica.* 2013; 7(14): 60–8.
 42. Levac DE, Sveistrup H. Motor Learning and Virtual Reality. En: Weiss PLT, Keshner EA, Levin MF, editores. Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation. Nueva York: Springer; 2014. p. 25–46.
 43. Weiss P, Keshner E, Levin M. Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation

[Internet]. Virtual Reality. New York: Springer; 2014. 242 p. Disponible en: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4939-0968-1.pdf>

44. Bermúdez BS, Fluet GG, Llorens R, Deutsch JE. Virtual reality for sensorimotor rehabilitation post stroke: Design principles and evidence. In: Reinkensmeyer DJ, editor. *Neurorehabilitation Technology*, Second Edition. 2nd ed. Springer; 2016. p. 573–603.
45. Paik N-J, Kim W-S. Stroke. En: Brunoni A, Loo C, Nitsche M, editores. *Transcranial Direct Current Stimulus in Neuropsychiatric Disorders*. Switzerland: Springer; 2016. p. 315–328.
46. Stalvey M. Proprioceptive Neuromuscular Facilitation. In: Bandy W, Sanders Ba, editors. *Therapeutic Exercise for Physical Therapist Assistants*. 2nd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2008. p. 137–170.
47. Adler S, Beckers D, Buck M. *PNF in practice*. 3rd ed. Springer; 2008.
48. Yang C, Lin Y, Cai M, Qian Z, Kivol J, Zhang W. Cognitive fatigue effect on rehabilitation task performance in a haptic virtual environment system. *J Rehabil Assist Technol Eng*. 2017;4.
49. Teklemariam HG, Das AK. A case study of phantom omni force feedback device for virtual product design. *Int J Interact Des Manuf*. 2017; 11(4): 881–892.
50. Caramenti M, Bartenbanch V, Gasperotti L, Fonseca L, Berger T, Pons J. Challenges in Neurorehabilitation and Neural Engineering. En: Pons J, Raya R, González J, editores. *Emerging Therapies in Neurorehabilitation II*. Vo. 10. Springer; 2016. p. 1–27.
51. Hutchison D. *Universal Access in Human Computer Interaction. users and Context Diversity*. 3rd ed. Antona Margherita SC, editor. Springer; 2016.
52. Threapleton K, Drummond A, Standen P. Virtual rehabilitation: What are the practical barriers for home-based research? *Digit Heal*. 2016;2:1–11.
53. Rand D, Givon N, Bar MA. A video-game group intervention: Experiences and perceptions of adults with chronic stroke and their therapists. *Can J Occup Ther*. 2018; 85(2): 158–168.
54. Yu H-C, Wu F-G. The Haptic Feedback Design of Augmented reality Virtual Keyboard on the Air. En: Stephanidis C, Antona M, editores. *Universal Access in Human-Computer Interaction Design and development methods for Universal Access*. 1st ed. Springer; 2014. p. 463–473.

55. Lewis J, Merritt P, Bowler M, Brown D, Standen PJ. Evaluation of the suitability of games based stroke rehabilitation using the Novint Falcon. In: Proceedings of the 3rd Interactive Technologies and Games (ITAG) Conference: Education, Health and Disability, 2010. Nottingham Trent University; 2010. p. 95–106.
56. Bannwart M, Pyk P, Kiper D, Eng K, Gassert R, Kim Y. Usability assessment of low-cost vibration motors for presenting vibrotactile feedback in sensory and motor rehabilitation. In: 2013 International Conference on Virtual Rehabilitation, ICVR 2013. Philadelphia; 2013. p. 206–207.
57. Bark K, Hyman E, Tan F, Cha E, Jax SA, Buxbaum LJ, et al. Effects of vibrotactile feedback on human learning of arm motions. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2015; 23(1): 51–63.
58. Schätzle S, Ende T, Wüsthoff T, Preusche C. VibroTac: An ergonomic and versatile usable vibrotactile feedback device. En: Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. Viareggio; 2010. p. 670–675.
59. Prewett MS, Elliott LR, Walvoord AG, Covert MD. A meta-analysis of vibrotactile and visual information displays for improving task performance. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part C Appl Rev.* 2012; 42(1): 123–132.
60. D'Alonzo M, Dosen S, Cipriani C, Farina D. HyVE: Hybrid vibro-electrotactile stimulation for sensory feedback and substitution in rehabilitation. Vol. 22, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering.* 2014. p. 290–301.
61. Cipriani C, Dalonzo M, Carrozza MC. A miniature vibrotactile sensory substitution device for multifingered hand prosthetics. Vol. 59, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* 2012. p. 400–408.
62. Van Breda E, Verwulgen S, Saeys W, Wuyts K, Peeters T, Truijen S. Vibrotactile feedback as a tool to improve motor learning and sports performance: A systematic review. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2017; 3(1): 1–12.
63. Weber P, Rueckert E, Calandra R, Peters J, Beckerle P. A low-cost sensor glove with vibrotactile feedback and multiple finger joint and hand motion sensing for human-robot interaction. 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016. 2016. p. 99–104.

64. Kapur P, Premakumar S, Jax SA, Buxbaum LJ, Dawson AM, Kuchenbecker KJ. Vibrotactile feedback system for intuitive upper-limb rehabilitation. In: Proceedings - 3rd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2009. 2009. p. 621–622.
65. Guo W, Ni W, Chen IM, Ding ZQ, Yeo SH. Intuitive vibro-tactile feedback for human body movement guidance. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009. 2009. p. 135–140.
66. Reinkensmeyer DJ. Neurorehabilitation Technology. Neurorehabilitation Technology. London: Springer; 2012.
67. Levin MF, Weiss PL, Keshner EA. Emergence of Virtual Reality as a Tool for Upper Limb Rehabilitation: Incorporation of Motor Control and Motor Learning Principles. *Phys Ther.* 2015; 95(3): 415–25.
68. Sigrist R, Rauter G, Riener R, Wolf P. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychon Bull Rev.* 2013; 20(1): 21–53.
69. Ellis SR. What are virtual environments? *IEEE Comput Graph Appl.* 1994 Jan; 14(1): 17–22.
70. Shapi'i A, Mat Zin NA, Elaklouk AM. A Game System for Cognitive Rehabilitation. *Biomed Res Int.* 2015; 2015: 1–7.
71. Radomski MV, Trombly CA. Occupational Therapy for Physical Dysfunction [Internet]. 7th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2014. Disponible en: <https://www.yumpu.com/en/document/read/59490813/occupational-therapy-for-physical-dysfunction-seventh-edition>
72. Barrett N, Swain I, Gatzidis C, Mecheraoui C. The use and effect of video game design theory in the creation of game-based systems for upper limb stroke rehabilitation. *J Rehabil Assist Technol Eng.* 2016.
73. Blázquez A, Casado C, Palacios JA. Producción de un Videojuego en Realidad Virtual con Seguimiento de Movimiento en Visor y Controladores Manuales utilizando Metodología Ágil. Universidad Complutense de Madrid; 2017.
74. Patrasitidecha A. Comparison and evaluation of 3D mobile game engines [Internet]. Chalmers University of Technology. University of Gothenburg; 2014. Disponible en:

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/193979/193979.pdf>

75. Zarrad A. Game Engine Solutions. En: Cvetković D, editor. Simulation and Gaming [Internet]. Belgrado: IntechOpen; 2018. p. 75–87. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/simulation-and-gaming/game-engine-solutions>
76. González C, Gracia M, Sanagustín L, Romero D. Análisis: Motores gráficos y su aplicación en la industria [Internet]. TecsMedia. Aragón; 2015. p. 16. Disponible en: http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/InvestigacionInnovacion Universidad/Areas/Sociedad_Informacion/Documentos/Estado del arte GameEngines y su impacto en la industria.pdf
77. Nixon D. Getting Started. En: Nixon D, editor. Unreal Engine 4 for Beginners [Internet]. 2017. p. 19–27. Disponible en: https://www.amazon.com/Unreal-Engine-Beginners-David-Nixon-ebook/dp/B01MYCQ1D5/ref=sr_1_25_sspa?s=books&ie=UTF8&qid=1523609299&sr=1-25-spons&keywords=unreal+engine&psc=1
78. Feng L, Wei W. An empirical study on user experience evaluation and identification of critical UX issues. *Sustain*. 2019; 11(8).
79. Álvarez-Xochihua O, Muñoz-Merino PJ, Muñoz-Organero M, Delgado Kloos C, González-Fraga JA. Comparing Usability, User Experience and Learning Motivation Characteristics of Two Educational Computer Games. In: Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems [Internet]. SCITEPRESS - Science and Technology Publications; 2017. p. 143–150. Disponible en: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006338901430150>
80. Hassenzahl M, Tractinsky N. User experience - A research agenda. *Behav Inf Technol*. 2006; 25(2): 91–97.
81. Saarniit E. Assessing the Influence on User Experience of Web Interface Interactions Across Different Devices. Tallinn University; 2016.
82. Schrepp M, Held T, Laugwitz B. The influence of hedonic quality on the attractiveness of user interfaces of business management software The influence of hedonic quality on the attractiveness of user interfaces of business management software. 2006; (January 2018).
83. Bangor A, Kortum PT, Miller JT. An empirical evaluation of the system usability scale. *Int J*

- Hum Comput Interact. 2008; 24(6): 574–94.
84. Grier RA, Bangor A, Kortum P, Peres SC. The system usability scale: Beyond standard usability testing. *Proc Hum Factors Ergon Soc.* 2013; 187–191.
 85. Bangor A, Staff T, Kortum P, Miller J, Staff T. Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale. *Determ what Individ SUS scores mean adding an adjective Rat scale.* 2009; 4(3): 114–123.
 86. Lewis JR, Sauro J. Item Benchmarks for the System Usability Scale. *J Usability Stud [Internet].* 2018;13(3):158–67. Disponible en: http://uxpajournal.org/wp-content/uploads/sites/8/pdf/JUS_Lewis_May2018.pdf
 87. Alsinglawi B, Alnajjar F, Mubin O, Novoa M. A Framework for Home-Based Stroke Rehabilitation Using Interactive Games and Augmented Reality Feedback. En: Masia L, Micera S, Akay M, Pons J, editores. *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation III ICNR 2018 Biosystems & Biorobotics.* Springer; 2019. p. 252–255.
 88. Shin JH, Kim MY, Lee JY, Jeon YJ, Kim S, Lee S, et al. Effects of virtual reality-based rehabilitation on distal upper extremity function and health-related quality of life: A single-blinded, randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil.* 2016;13(1): 1–10.
 89. Neofect. RAPAEL SMART GLOVE [Internet]. Neofect; 2017 [citado 20 Feb 2019]. Disponible en: <http://www.neofect.com/en/product/rapael/>
 90. Kim H, Miller LM, Fedulow I, Simkins M, Abrams GM, Byl N, et al. Kinematic data analysis for post-stroke patients following bilateral versus unilateral rehabilitation with an upper limb wearable robotic system. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2013; 21(2): 153–164.
 91. Silva AJ, Ramirez OAD, Vega VP, Oliver JPO. PHANToM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability. En: 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA). Cuernavaca: IEEE; 2009. p. 193–198.
 92. Arteaga MA. Puesta en marcha del robot Omni Phantom de Sensable. Universidad Nacional Autónoma de México; 2014.
 93. Andaluz VH, Salazar PJ, Escudero V M, Bustamante D C, Silva S M, Quevedo W, et al. Virtual reality integration with force feedback in upper limb rehabilitation. En: Bebis G, Boyle R, Parvin B, Koracin D, Porikli F, Skaff S, et al., editores. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in*

- Bioinformatics). Las Vegas: Springer; 2016. p. 259–268.
94. Karbasizadeh N, Aflakiyan A, Zarei M, Masouleh MT, Kalhor A. Dynamic identification of the Novint Falcon Haptic device. En: 2016 4th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). Tehran; 2016. p. 518–523.
 95. Liu Z, Zhang Y, Rau PLP, Choe P, Gulrez T. Leap-motion based online interactive system for hand rehabilitation. En: Rau P, editor. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Los Angeles: Springer; 2015. p. 338–347.
 96. Gloreha. Gloreha ARIA [Internet]. 2018 [citado 22 Feb 2019]. Available from: <https://www.gloreha.com/gloreha-aria>
 97. Crocetta TB, de Araújo LV, Guarnieri R, Massetti T, Ferreira FHIB, de Abreu LC, et al. Virtual reality software package for implementing motor learning and rehabilitation experiments. *Virtual Real* [Internet]. 2018 Sep 18; 22(3): 199–209. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10055-017-0323-2>
 98. Cuideiro Mazaira FJ, Arias Rodriguez P, Rivadulla Fernández C, Flores González JC, Cotos Yañez JM. Sistema de Realidad Virtual para la Evaluación y el Tratamiento de los Transtornos Motores Asociados a las Enfermedades Neurodegenerativas y a la Edad. España; 201130741, 2014.
 99. Amazon. NEOFECT Home Smart Glove - Active Finger & Hand Rehabilitation Solution.
 100. Ebay. CyberGlove Touch, left hand, tactile feedback, wired, instrumented glove [Internet]. 2018 [citado 22 Feb 2019]. Disponible en: https://www.ebay.com/itm/CyberGlove-Touch-left-hand-tactile-feedback-wired-instrumented-glove-/163018679345?_ul=MX
 101. Delft Haptics Lab. “Phantom Omni” – 6 DOF master device [Internet]. 2018 [citado 25 Feb 2019]. Disponible en: <http://www.delfthapticslab.nl/device/phantom-omni/>
 102. Oculus. Oculus Rift [Internet]. Oculus.com. 2017 [citado 27 Feb 2019]. Disponible en: <https://www.oculus.com/rift/>
 103. Virtual Reality Society. The Novint Falcon Haptic System [Internet]. 2017 [citado 27 Feb 2019]. Disponible en: <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality-gear/haptic/novint-falcon.html>
 104. HTC. SteamVR Base Station 2.0. [Internet]. 2019. [Citado 28 Feb 2019]. Disponible en:

- <https://www.vive.com/sea/accessory/base-station2/>.
105. HTC. VIVE Pro: El visor VR de grado profesional [internet]. [Citado 27 Feb 2019]. Disponible en: <https://www.vive.com/mx/product/vive-pro/>
 106. Daniel M, Rosalee W. User-Centered Website Development. A human computer Interaction Approach. New Jersey: Pearso Prentice Hall; 2004.
 107. García Navas M. El color como recurso expresivo: análisis de las series de televisión Mad Men y Breaking Bad [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/385372>
 108. Kemper M, Guido R, Brian M. AdvancED Flash Interface Design. AdvancED Flash Interface Design. friendsof; 2006.
 109. Ghamari H, Amor C. The Role of Color in Healthcare Environments, Emergent Bodies of Evidence-based Design Approach. Sociol Anthropol. 2016; 4(11): 1020–1029.
 110. Elliot AJ. Color and psychological functioning: A review of theoretical and empirical work. Front Psychol. 2015; 6(APR):1–8.
 111. Science C. The colour of medicine. Can Med Assoc J. 2009; 181(6–7): 403.
 112. Ribera M. La nueva normativa de accesibilidad WCAG 2.0 y los documentos en internet [Internet]. Universitat Pompeu Fabra. 2009 [citado 1 Dic 2019]. Disponible en: <https://www.upf.edu/hipertextnet/numero-7/wcag-2-0.html>
 113. Lujan S. Accesibilidad Web: Criterios de conformidad de WCAG 2.0 [Internet]. Universidad de Alicante. 2020 [citado 16 Dic 2019]. Disponible en: <http://accesibilidadweb.dlsi.ua.es/?menu=criterios-2.0#criterios-nivel-AAA>
 114. W3C. Comprender las WCAG 2.0. [Internet]. 2019. [Citado 17 Dic 2019]. Disponible en: <http://www.sidar.org/traduccion/wcag20/es/comprender-wcag20/#:~:text=%22Comprender%20las%20WCAG%202.0%22%20proporciona,con%20diferentes%20tipos%20de%20discapacidad.>
 115. Future Technology Devices International Ltd. UM232H Single Channel. 2012.
 116. ST. STM32Cube [Internet]. 2019 [citado 10 Mar 2019]. Disponible en: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>
 117. Brooke J. SUS - A quick and dirty usability scale. CRC Press. 1996; 189–194.

118. Gerłowska J, Skrobas U, Grabowska-Aleksandrowicz K, Korchut A, Szklener S, Szczęśniak-Stańczyk D, et al. Assessment of perceived attractiveness, usability, and societal impact of a multimodal Robotic Assistant for aging patients with memory impairments. *Front Neurol*. 2018; 9(JUN): 1–13.
119. Link MW, Lai J, Bristol K. Design, User Experience, and Usability. *User Experience Design Practice* [Internet]. Vol. 8520, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2014. 319–327 p. Disponible en: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84958552361&partnerID=tZOtx3y1>
120. Centro de Cirugía Especial de México IAP (CCEM). Estadísticas de Discapacidad en México [Internet]. 2017 [citado 25 Sep 2018]. Disponible en: <http://www.ccem.org.mx/statmex/>
121. Yin CW, Sien NY, Ying LA, Chung SFCM, Tan May Leng D. Virtual reality for upper extremity rehabilitation in early stroke: A pilot randomized controlled trial. *Clin Rehabil* [Internet]. 2014 ;28(11): 1107–1114. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0269215514532851>
122. Broeren J, Björkdahl A, Pascher R, Rydmark M. Virtual Reality and Haptics as an Assessment Device in the Postacute Phase after Stroke. *CyberPsychology Behav* [Internet]. 2002; 5(3): 207–211. Disponible en: <http://www.liebertonline.com/doi/abs/10.1089/109493102760147196>
123. Mooren FC, editor. Degree of Freedom. En: *Encyclopedia of Exercise Medicine in Health and Disease* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012. p. 231–231. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-540-29807-6_2288
124. D’Elia B, Fida B, Bernabucci I, Conforto S, D’Alessio T, Schmid M. The influence of haptic feedback on hand movement regularity in elderly adults. *ACM Int Conf Proceeding Ser*. 2013.

ANEXOS

Anexo 1: Cuestionario 1. Sobre la rehabilitación de miembro superior posterior a un accidente cerebrovascular.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
LICENCIATURA EN BIOINGENIERÍA MÉDICA
REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR EN PERSONAS
POSTERIOR A UN ACCIDENTE CEREBROVASCULAR



La presente encuesta consta de dos secciones, la primera consiste en preguntas relacionadas con la rehabilitación de miembro superior en personas que sufrieron un evento vascular cerebral, y la segunda está relacionada con el uso de ambientes virtuales en rehabilitación.

Con la información que se obtenga de esta encuesta, se complementará el protocolo de tesis titulado **“Desarrollo de un sistema de rehabilitación de miembro superior en un ambiente virtual didáctico para recuperación de la movilidad posterior a un accidente cerebrovascular”**. Toda la información recabada será utilizada únicamente con fines de la presente investigación. Todos los datos personales serán tratados de manera confidencial.

Información del encuestado	
Nombre:	
Fecha:	Lugar(es) de trabajo:

Por favor complete la encuesta cuidadosamente, siendo lo más claro posible en la descripción de los ejercicios y marque con una X la(s) respuesta(s) que se asemeje más a la práctica clínica.

1.- ¿Cuántos pacientes con ECV ha tratado?

- 1-3 4-6 7-10 11 o más.

2.- ¿Cuántos de ellos tenían problemas en el miembro superior?

- Todos Más de la mitad La mitad Menos de la mitad

3. ¿En qué rango de edad se encuentran la mayoría de estos pacientes?

- Menor de 20 años 20 a 25 años 26 a 60 años + 60 años

Para las siguientes preguntas imagine un paciente con hemiparesia a causa de un evento cerebral vascular capaz de realizar rehabilitación activa del miembro superior.

4.- ¿Cuánto dura normalmente una sesión de terapia física?

- 15 minutos Media hora Una hora Otro _____

5.- ¿Cuántas sesiones a la semana se realizan?

- 1 2 3 4 5

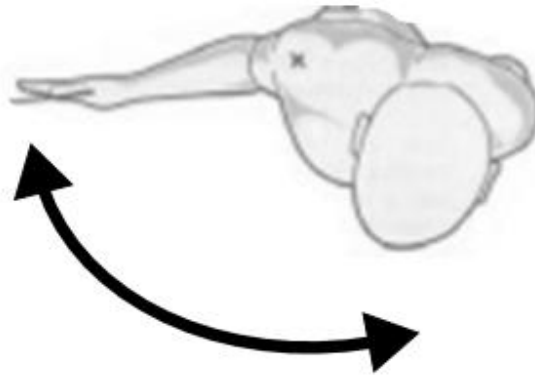
6.- ¿Cuántas sesiones en promedio realiza un paciente hasta terminar su tratamiento?

7.- ¿Existen descansos durante la sesión? Si la respuesta es afirmativa indique el tiempo de estos descansos.

8.- En general los ejercicios de rehabilitación para miembro superior abarcan:

- Sólo muñeca Sólo codo Sólo hombro Las tres articulaciones al mismo tiempo.
- Las tres articulaciones por separado Muñeca y codo al mismo tiempo Hombro y codo al mismo tiempo Muñeca y hombro al mismo tiempo

9.- ¿Qué opina del siguiente movimiento como ejercicio de rehabilitación de hombro? y en caso de que se pueda realizar ¿En qué posición debe encontrarse el paciente para realizarlo sin daño alguno?



13.- ¿En qué momento se decide aumentar la dificultad de los ejercicios?

AMBIENTES VIRTUALES EN REHABILITACIÓN

14.- Seleccione que apoyos ha utilizado durante la terapia y describa como los utilizó:

Computadoras. _____

Videojuegos. _____

Dispositivos hápticos (Omni Phantom, novint falcon, etc.).



Figura 74:
Omni Phantom

Robots para rehabilitación. _____

Aplicaciones. _____

Un dispositivo háptico se refiere a aquellas herramientas que nos permite simular la respuesta de un objeto después de tocarlo, permitiendo sentirlo (fuerza, vibración, temperatura). Permiten el intercambio de información entre el humano y el objeto virtual (en el entorno virtual o videojuego).

15.- ¿Qué información adicional le sería útil para evaluar el desempeño en la rehabilitación de miembro superior en un entorno virtual, de los pacientes y que no se puede obtener con las técnicas e instrumentos actuales? (Por ejemplo, tiempos, trayectorias, error en la trayectoria, etc.)

Anexo 2: Cuestionario 2. Evaluación de la interfaz de usuario por personal especializado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
 LICENCIATURA EN BIOINGENIERÍA MÉDICA
 REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR EN
 PERSONAS POSTERIOR A UN ACCIDENTE
 CEREBROVASCULAR



EVALUACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO (PERSONAL ESPECIALIZADO)

Esta evaluación permitirá identificar como los usuarios perciben la interfaz de usuario del Ambiente Virtual del Sistema de Rehabilitación de Miembro superior.

OCUPACIÓN:

AÑOS DE EXPERIENCIA:

INSTRUCCIONES: Marque con una X la opción que crea adecuada.

	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Indeciso	De acuerdo	Totalmente de acuerdo
1.- Creo que sería fácil usar este sistema en mi entorno clínico					
2.- Siento que mis pacientes estarán motivados al usar este sistema					
3.- El contenido presentado en la pantalla es apropiado para mis pacientes					
4. Creo que me gustaría usar este sistema frecuentemente					
5.- Encontré el sistema innecesariamente complejo					
6.- Creo que el sistema es fácil de usar					

7.- Creo que necesitaría la ayuda de un técnico para ser capaz de usar el sistema						
8.- Creo que las diversas funciones del sistema están bien integradas						
9.- Pienso que existe mucha inconsistencia en el sistema						
10.- Creo que la mayoría de las personas aprenderían a usar el sistema rápidamente						
11.- Encontré al sistema muy incómodo para usarlo						
12.- Me siento seguro usando el sistema						
13.- Necesito aprender muchas cosas antes de poder usar el sistema						

Con la ayuda de las palabras de cada línea, indica con una X la descripción más apropiada a la interfaz de usuario

Simple	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Complicado
Feo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Atractivo
Práctico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Poco práctico
Estilizado	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Desaliñado
Predictivo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	No predictivo
Barato	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Premium
No imaginativo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Creativo

Bueno	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Malo
Confuso	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Estructurado
Aburrido	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Cautivador

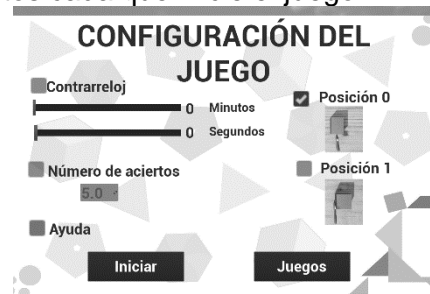
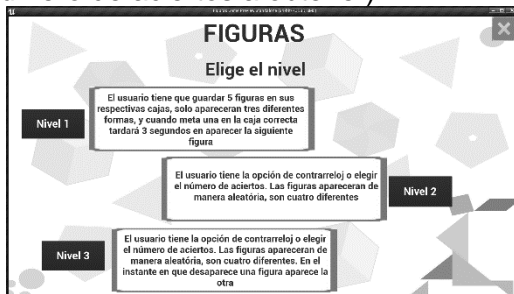
Marque con una X las escalas que le gustaría que estuvieran en el Ambiente Virtual para la evaluación del estado del paciente.

Escala de Brunnstrom (Espasticidad)	<input type="checkbox"/>
Escala de Daniels (Valoración muscular)	<input type="checkbox"/>
Escala modificada de Ashworth (Tono muscular)	<input type="checkbox"/>
Índice de Barthel (Actividades de la vida diaria)	<input type="checkbox"/>
Escala Pfeiffer (Deterioro cognitivo)	<input type="checkbox"/>
Minimental test (Cognitivo)	<input type="checkbox"/>
Evaluación del dolor (EVA)	<input type="checkbox"/>
Escala de Rankin (Actividades de la vida diaria)	<input type="checkbox"/>

Para aumentar la dificultad de los juegos interactivos, ¿Qué opción cree que sea más conveniente?

Elegir entre 3 niveles por cada juego con características predefinidas (tiempo, número de aciertos a obtener).

Poder modificar el tiempo, número de aciertos a obtener, velocidad de los objetos cada que inicie el juego.



COMENTARIOS:

Anexo 3: Cuestionario 3. Evaluación de la usabilidad y funcionalidad del sistema.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
LICENCIATURA EN BIOINGENIERÍA MÉDICA
REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR EN PERSONAS
POSTERIOR A UN ACCIDENTE CEREBROVASCULAR



EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD DE LA INTERFAZ DE USUARIO Y DEL
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REHABILITACIÓN (USUARIO)

Investigadores: Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas, Dra. Adriana H. Vilchis González,
P.L.B.M. Monserrat Ríos Hernández

La Facultad de Ingeniería está realizando un proyecto de investigación en colaboración con la Pasante en la Licenciatura en Bioingeniería Médica Monserrat Ríos Hernández. El objetivo de esta evaluación es identificar como los usuarios perciben la interfaz de usuario y la interfaz háptica del Ambiente Virtual del Sistema de Rehabilitación de Miembro Superior.

Si usted acepta participar en este estudio ocurrirá lo siguiente: realizará dos sesiones con un sistema compuesto de un entorno virtual (juego de computadora) y un dispositivo háptico, el cual vibrará dependiendo de las acciones que realice en el entorno virtual. Antes de utilizar el Sistema tendrá que responder la **Primera parte** de este cuestionario, lo que nos permitirá conocer su relación con el uso de computadoras y videojuegos. Posteriormente usted utilizará el Sistema, en donde la primera sesión consistirá en jugar en el ambiente virtual con el monitor de la computadora, es decir sin el casco de realidad virtual, mientras que la segunda sesión usted realizará las mismas actividades que la primera sesión, pero ahora con el casco de realidad virtual. Al finalizar cada una de las sesiones tendrá que contestar la sección correspondiente de la **Segunda parte** de este cuestionario, donde se le preguntará sobre su experiencia con el sistema. Por último, al finalizar ambas sesiones se le pedirá que conteste la **Tercera parte** de este cuestionario, dónde nos ayudará a saber en qué sesión se sintió más cómoda y que dispositivo de visualización (monitor de computadora o casco de realidad virtual) le agradó más.

La información que se obtenga de este cuestionario permitirá concluir el trabajo de tesis que lleva por nombre: “**Desarrollo de un Sistema de Rehabilitación de miembro superior en un ambiente virtual para la recuperación de la movilidad después de un accidente cerebrovascular y fracturas**”. Cabe destacar que toda la información recabada será utilizada con fines de la presente investigación y que todos los datos personales serán tratados de manera confidencial.

NOMBRE: _____

OCUPACIÓN: _____

EDAD: _____

GÉNERO: _____

ESTUDIOS FINALIZADOS: _____

PRIMERA PARTE: Antes de comenzar con la prueba de usabilidad nos gustaría conocer su experiencia con el uso de videojuegos y computadoras.

1.- ¿Tiene experiencia previa con el uso de computadoras? En caso de ser negativo saltarse a la pregunta 4.

2.- ¿Para qué utiliza las computadoras? (creación de documentos, navegación en internet, juegos, diseño gráfico o CAD, uso de redes sociales o correo)

3.- ¿Cuántas horas a la semana utiliza la computadora?

4.- Del 1 al 10 (siendo 1 deficiente y 10 excelente) ¿Cómo calificaría sus conocimientos respecto al uso de computadoras?

5.- ¿Ha jugado videojuegos? Si la respuesta es afirmativa indique la regularidad en que utiliza videojuegos.

6.- ¿Sabe lo que es la Realidad Virtual? Si es así explique lo que usted entiende por Realidad Virtual

7.- ¿Ha tenido alguna experiencia relacionada con la Realidad Virtual? En caso de ser afirmativo explique su experiencia.

8.- ¿Ha sufrido mareos o malestares en las siguientes situaciones?

- a) Al viajar.
- b) En el uso de computadoras.
- c) En el uso de videojuegos.
- d) En el uso de Realidad Virtual.

PARTE DOS: Después de haber utilizado el sistema de rehabilitación nos gustaría conocer su experiencia con este sistema.

La siguiente sección permitirá evaluar el Sistema de Rehabilitación en general. Marque con una X la opción que crea adecuada.

Sesión	Totalmente en desacuerdo		En desacuerdo		Indeciso		De acuerdo		Totalmente de acuerdo	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1.- La información proporcionada por el ambiente virtual es clara										
2.- Los movimientos presentados en la pantalla tienen sentido con los que realizo										
3.- Me gustan los ambientes de los juegos										
4.- Las tareas son adecuadas para mí										
5.- Presenté alguna molestia física o dolor durante su uso										
6.- Experimenté molestias visuales o auditivas durante su uso										
7.- Terminé las actividades satisfactoriamente										
8.- Me sentí motivado para terminar los juegos										
9.- Encontré el sistema innecesariamente complejo										
10.- Creo que el sistema es fácil de usar										
11.- Creo que necesitaría la ayuda de un técnico para ser capaz de usar el sistema										
12.- Creo que el ambiente virtual y la interfaz háptica se encuentran bien integradas (combinadas) para un correcto funcionamiento										
13.- Pienso que existe mucha inconsistencia en el sistema										
14.- Creo que la mayoría de las personas aprenderían a usar el sistema rápidamente										
15.- Encontré al sistema muy incómodo para usarlo										
16.- Me siento seguro usando el sistema										
17.- Necesito aprender muchas cosas antes de poder usar el sistema										

Para la evaluación de la estética de la interfaz de usuario, indique con una X la descripción más cercana a la percepción que usted tuvo sobre el Sistema a las palabras de cada línea.

Simple	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Complicado
Feo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Atractivo
Práctico	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Poco práctico
Estilizado	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Desaliñado
Predictivo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	No predictivo
Barato	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Premium
No imaginativo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Creativo
Bueno	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Malo
Confuso	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Estructurado
Aburrido	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Cautivador

Para la evaluación del ambiente virtual coloque una X en una escala de 1 a 5 sobre lo que usted piensa sobre los escenarios virtuales después de haberlos utilizado con el monitor de computadora y coloque un – después de haber utilizado el casco de realidad virtual.

Ambiente Virtual	1 (Malo)	2	3	4	5 (Bueno)
Sentimiento General					
Retroalimentación del sistema					
Intuitivo					
Aprendizaje por uso					
Práctico					
Recordar la función de cada uno de los botones y objetos del entorno.					
Confiabilidad					
Precisión del movimiento					
Velocidad del sistema					
Flujo del movimiento del extremo final del robot (lápiz, canasta, gancho o mano)					
Control de la posición					

Rapidez de la respuesta					
Detección de errores					
Esfuerzo físico (1-malo, 5 -bueno)					
Esfuerzo mental (1-Malo, 5- bueno)					

Para la evaluación de la interfaz háptica o del sistema físico, coloque una X en la opción que crea adecuada después de haber utilizado el Sistema de Rehabilitación.

Dispositivo háptico	1 (Malo)	2	3	4	5 (Bueno)
Sentimiento General					
Retroalimentación del sistema					
Intuitivo					
Aprendizaje por uso					
Práctico					
El sistema te limita la velocidad de los movimientos					
Confiabilidad					
Precisión del movimiento					
Control de la posición					
Rapidez de la respuesta					
Detección de errores por la vibración					
El casco de realidad virtual funciona bien (solo si se usa)					
Esfuerzo físico (1-malo, 5 -bueno)					
Esfuerzo mental (1-Malo, 5- bueno)					

PARTE TRES: Después de haber concluido las dos sesiones nos gustaría saber en cual sesión se sintió más cómodo y que dispositivo de visualización (monitor de computadora o casco de realidad virtual) le agrado más.

En la siguiente tabla coloque una X en la columna del dispositivo con el cual se sintió más identificado(a) con las siguientes situaciones. En caso de que no creas haber sentido ninguna diferencia coloca una X en ambas columnas.

Situación		Monitor de computadora	Casco de realidad virtual
Mayor presencia (mayor sentimiento de estar dentro del ambiente virtual)			
Mayor inmersión	Imagen más clara y representa mejor a la realidad		
	El sonido era más nítido y te hacía sentir dentro del ambiente virtual		
	La sensación de tocar los objetos era más clara		
Mayor interacción con el ambiente virtual			
Menor distorsión óptica			
Mejor percepción en las distancias entre objetos			

Por último, si le pidieran realizar una sesión más ¿con que dispositivo de visualización le gustaría realizarla y por qué?

COMENTARIOS:

Anexo 4: Ubicación de los componentes del Sistema de Rehabilitación.

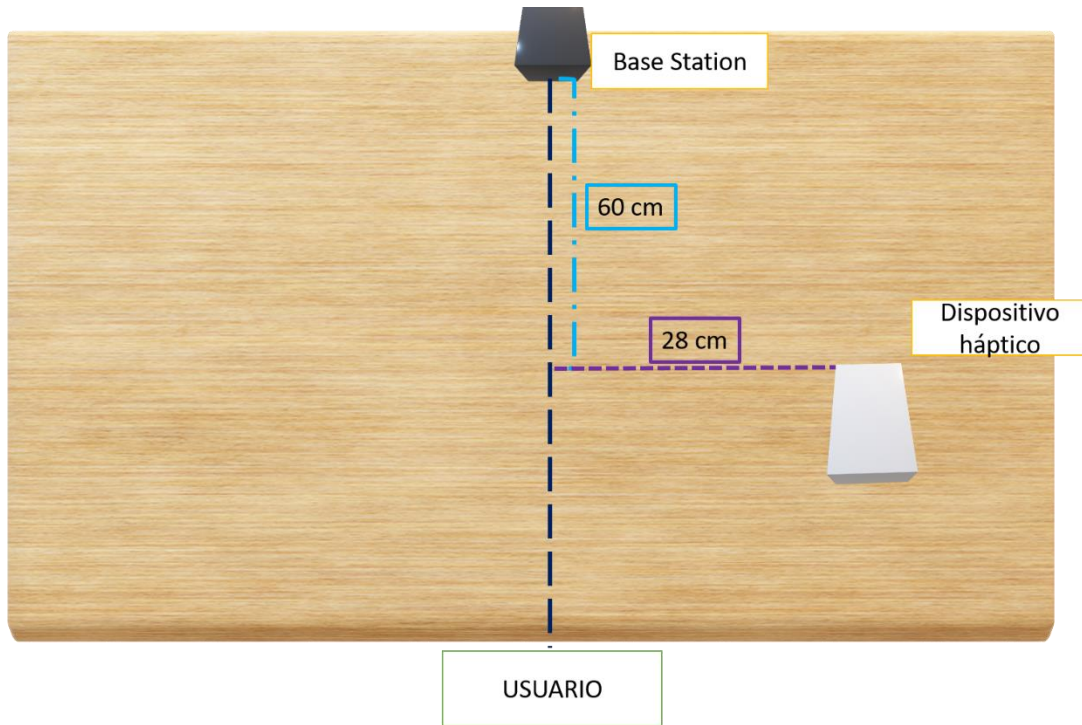


Figura 75; Distancias entre los componentes del Sistema de Rehabilitación

Para el correcto funcionamiento del sistema el usuario debe estar centrado junto con la computadora o la estación base, la cual se debe encontrar a 60 cm del dispositivo háptico, el cual a su vez se encontraba a una distancia aproximada de 28 cm de la línea central. En esta línea se debían de alinear el monitor o el HMD junto con la estación base.

La estación base se debía colocar a una altura de 80 cm respecto a la mesa y debía estar mirando hacia el HMD.

Anexo 5: Dictamen del Comité de Ética en Investigación

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA

COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN

Documento para revisión y autorización de protocolos de investigación

Nombre del alumno: MONSERRAT RIOS HERNÁNDEZ

No. De Cuenta: ___1112623 Teléfono:7224125233

E-mail: ___r.h.monse@gmail.com_____

Licenciatura: Posgrado: _____

Maestría _____ Doctorado: _____ Especialidad Médica: _____

Nombre del Proyecto:

Desarrollo de un sistema de rehabilitación de miembro superior en un ambiente virtual para la recuperación de la movilidad después de un accidente cerebrovascular y fracturas.

Director del Proyecto: DR. JUAN MANUEL JACINTO VILLEGAS

Teléfono: 2140855 ext 1203

Tipo de investigación: Bibliográfica: _____ Con animales: _____

Con personas: _____ _____

Riesgo de perder o modificar la función: _____ la vida: _____

Aprobado: _____ _____ Rechazado: _____

RESPONSABLE DEL COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN

M.A.M. RICARDO PAULINO JOSÉ GALLARDO DÍAZ