

Desarrollo de un ambiente virtual para la rehabilitación de las extremidades superiores.



Juan Manuel Oropeza Salas

Facultad de Ciencias de la Computación.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Tesis para obtener el título de:

Licenciado en Ciencias Computacionales.

Asesores:

Dr. Luis Enrique Sucar Succar.

Dr. Manuel Martín Ortiz.

Dr. Felipe Orihuela Espina.

Quisiera dedicar este trabajo de tesis a todas las personas que me han respaldado en el transcurso de estos años, en momentos felices y otros que resultaron bastante difíciles tanto en mi carrera así como a nivel personal. En especial a mi madre (Odilia Salas Barrios) que en estos últimos años ha estado apoyándome en todo, ya que sin ella no existiría este trabajo, a mi padre (Jorge Ángel Ambrosio Oropeza Herrera) que ahora no esta conmigo, pero en mi corazón estará toda mi vida. Y por último a mis hermanos que han estado alentándome todo este tiempo.

AGRADECIMIENTO.

La verdad no se como agradecer esta oportunidad que me dieron para realizar este trabajo de investigación. Le agradezco a dios por encontrar a la gente indicada para guiarme y que me ha ayudado para salir adelante en este trabajo que en ocasiones sentía que rebasaba mis capacidades. Gracias al Dr. Luis Enrique Sucar Succar por darme la oportunidad en ser parte del proyecto *Gesture Therapy*, al Dr. Felipe Orihuela Espina que fue un gran apoyo tanto en la investigación como en la redacción en esta tesis, también al Dr. Manuel Martín Ortiz por los consejos que me ha dado para este trabajo. Agradecer a mi familia por apoyarme: Odilia Salas Barrios (madre), Jorge Oropeza Herrera (padre), Jorge Oropeza Salas, Juan Pablo Oropeza Salas, David Oropeza Salas, Juanita Oropeza Salas, Leonila Oropeza Salas. A todos los amigos que tengo y que he hecho en el paso de estos años: Héctor León Ortiz, Gabriel Jiménez Rosendo, Alejandro Benítez Sandoval, Juan Carlos Cayetano Vargas, Rubén Palacios, Eymar, Raymundo López Guarneros, Iván Martínez, Juan Irving Vázquez, Patrick Heyer Wolhemberg, Roger Luis Velásquez, Shender Ávila Sansores, Hussein López. Si alguien se me olvido mencionar de antemano una disculpa.

Tabla de contenido

RESUMEN.	1
ABSTRACT.	3
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.	5
1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	6
1.2. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	7
1.3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	7
1.3.1. <i>Objetivos.</i>	7
1.3.2. <i>Hipótesis.</i>	8
1.4. TERAPIA DE GESTOS (<i>GESTURE THERAPY</i>).	9
1.5. CAMPO DE APLICACIÓN O DOMINIO.	9
1.6. CONTRIBUCIONES A LA CIENCIA.	10
1.7. EVALUACIÓN.	10
1.8. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.	11
CAPÍTULO 2 . ANTECEDENTES.	13
2.1. INTRODUCCIÓN.	14
2.2. INFARTO CEREBRAL.	14
2.3. TERAPIAS.	15
2.3.1. <i>Técnicas de compensación.</i>	16
2.3.2. <i>Técnicas de facilitación.</i>	16
2.3.3. <i>Enfoques Modernos.</i>	18
2.3.4. <i>Estimulación sensitivo-motora asistida por robots.</i>	19
2.3.5. <i>Terapias basadas en realidad virtual.</i>	23
2.3.6. <i>Otras alternativas de rehabilitación.</i>	31
2.3.7. <i>Análisis de tratamientos.</i>	32
2.4. CONCLUSIÓN.	32
CAPÍTULO 3 . TAXONOMÍA DE CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL DESARROLLO DE JUEGOS DE REHABILITACIÓN.	33
3.1. INTRODUCCIÓN.	34
3.2. LOS PILARES DE LA REHABILITACIÓN	34
3.3. CRITERIOS DE DESARROLLO DE JUEGOS PARA REHABILITACIÓN PROPUESTOS EN TRABAJOS ANTERIORES A ESTE.	35
3.4. CRITERIOS DE DESARROLLO PARA AMBIENTES VIRTUALES PROPUESTOS EN ESTA TAXONOMÍA.	36
3.4.1. <i>Edad</i>	36
3.4.2. <i>Destreza Motora.</i>	37
3.4.3. <i>Depresión Post-Ictus.</i>	38
3.4.4. <i>Estilo de vida.</i>	38
3.4.5. <i>Grupos de apoyo.</i>	38
3.4.6. <i>Estado de comorbilidad.</i>	39
3.4.7. <i>Ventana de oportunidad.</i>	39
3.4.8. <i>Adaptación al paciente.</i>	39
3.4.9. <i>Dosis.</i>	40

3.4.10. Retroalimentación adecuada.....	41
3.4.11. Combinación de tareas de diferente dificultad.....	41
3.4.12. Inmersión y presencia en el juego.....	41
3.4.13. Interés.....	42
3.4.14. Autosuficiencia.....	43
3.4.15. Cumplimiento o compromiso y adhesión a la terapia.....	43
3.4.16. Tolerancia.....	43
3.4.17. Tipo y rango de movimientos cubiertos.....	44
3.4.18. Tratamiento de la compensación de movimientos.....	44
3.4.19. Actividades funcionales y de la vida cotidiana.....	45
3.5. TAXONOMÍA DE CRITERIOS.....	45
3.6. DESARROLLO DE UN CUESTIONARIO PARA EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE LOS JUEGOS DE REHABILITACIÓN A LOS CRITERIOS DE DESARROLLO.....	46
3.6.1 Escalas de evaluación de la destreza motriz de los pacientes en rehabilitación.....	47
3.6.2 Escalas de evaluación de la función fisiológica de los pacientes en rehabilitación.....	48
3.6.3 Escalas para cuantificar elementos subjetivos a través de cuestionarios.....	49
3.7. ELABORACIÓN DE UN CUESTIONARIO PARA LA EVALUACIÓN DEL APEGO DE JUEGOS PARA REHABILITACIÓN A LOS CRITERIOS DE DISEÑO.....	51
3.8. CONCLUSIONES.....	52
CAPÍTULO 4 . DESARROLLO DEL PAQUETE DE JUEGOS PARA <i>GESTURE THERAPY</i>.....	54
4.1. INTRODUCCIÓN.....	55
4.2. MOTORES DE JUEGOS.....	55
4.2.1. Torque vs otros motores gráficos.....	57
4.3. TORQUE GAME BUILDER.....	59
4.4. PLATAFORMA “ <i>GESTURE THERAPY</i> ”.....	60
4.5. UN PAQUETE DE JUEGOS PARA LA TERAPIA DE GESTOS: ANÁLISIS DEL SISTEMA.....	62
4.5.1. Requerimientos del sistema.....	62
4.5.2. Diagramas de flujo de datos.....	65
4.5.3. Diseño de la interfaz.....	67
4.5.4. Funciones de comportamiento principales.....	69
4.5.5. Vistas e implementación.....	70
4.5.6. Limitaciones y fortalezas del sistema.....	73
4.6. CONCLUSIONES.....	74
CAPÍTULO 5 . EVALUACIÓN DEL APEGO DE LOS JUEGOS A LOS CRITERIOS DE DISEÑO.....	75
5.1. INTRODUCCIÓN.....	76
5.2. METODOLOGÍA.....	77
5.2.1 Cohorte de Experimentación.....	77
5.2.2. Transcurso de la sesión experimental.....	78
5.3.3. Sistema de Evaluación.....	79
5.3. RESULTADOS.....	80
5.3.1. Incidencias en la experimentación.....	80
5.3.2. Resultados parciales por pregunta.....	81
5.4. ANÁLISIS.....	96
5.4.1. Validez aparente del cuestionario.....	96

5.4.2. <i>Conformidad de los juegos desarrollados con la taxonomía.</i>	98
5.5. LIMITACIONES DEL EXPERIMENTO.	99
5.6. OPINIONES DE ALGUNOS EXPERTOS.	99
5.7. CONCLUSIONES.	102
CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	103
6.1 CONCLUSIONES FINALES.	104
6.2 TRABAJO A FUTURO.....	106
6.2.1. <i>Una taxonomía más refinada, necesaria y suficiente.</i>	106
6.2.2. <i>Completar el paquete de juegos.</i>	106
6.2.3. <i>Gesture Therapy, una plataforma en evolución.</i>	107
BIBLIOGRAFÍA	108
APÉNDICE	116
APÉNDICE 1. PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN.	116
APÉNDICE 2. CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN.	119
APÉNDICE 3. RELACIÓN ENTRE PREGUNTAS Y CATEGORÍAS A EVALUAR.	124
APÉNDICE 4. HOJA DE INFORMACIÓN.....	127
APÉNDICE 5. HOJA DE ACEPTACIÓN.	130

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 COMPONENTES DEL DISPOSITIVO DE T-WREX Y COMO DA SOPORTE A LA EXTREMIDAD AFECTADA DEL PACIENTE [61].	20
FIGURA 2.2 DISTINTAS VARIANTES DE ARMEO; EN LA PRIMERA IMAGEN ESTA ARMEO POWER, EN LA SEGUNDA ESTA ARMEO SPRING Y LA TERCERA ES ARMEO BOOM.	21
FIGURA 2.3 MOVIMIENTO BILATERAL CON MIME.	22
FIGURA 2.4 MOVIMIENTO UNILATERAL CON MIME.	22
FIGURA 2.5 UN PACIENTE EMPLEA EL <i>HAPTIC KNOB</i> PARA EL FORTALECIMIENTO DE LA MUÑECA.	23
FIGURA 2.6 EJEMPLO DE UN JUEGO DESARROLLADO PARA UN SISTEMA DE REHABILITACIÓN QUE APRUEBA EL WII MOTE.	24
FIGURA 2.7 IZQUIERDA: SE UTILIZA LA <i>PLAYSTATION 3</i> PARA ENTRENAR LOS DEDOS. DERECHA: SE EXPONE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA[33].	25
FIGURA 2.8 EL USUARIO INTERACTÚA CON EL SISTEMA <i>ELINOR</i> POR MEDIO DE LAS MANIJAS CONECTADAS AL SISTEMA.	26
FIGURA 2.9 RABBIT CHASE.	27
FIGURA 2.10 PLATAFORMA DE EJERCICIOS VIRTUAL CONTROLADA POR RATÓN.	28
FIGURA 2.11 EL PACIENTE SE COLOCA ENFRETE DEL EQUIPO DONDE SE ENCUENTRA LA CÁMARA WEB Y ESTE INTERACTÚA CON LOS JUEGOS POR MEDIO DEL GRIPPER CONECTADO AL EQUIPO.	29
FIGURA 2.12 INTERFAZ DEL SISTEMA DE RASTREO DE PARTÍCULA. EL TERAPEUTA CONFIGURA PREVIAMENTE EL SISTEMA DE SEGUIMIENTO, COMO EL COLOR A SEGUIR, EL AREA DE DESPLAZAMIENTO, ETC.	30
FIGURA 4.1 INTERFAZ DE TORQUE GAME BUILDER 59	59
FIGURA 4.2 INTERFAZ GRÁFICA DEL ENTORNO DE DESARROLLO <i>TORSION</i> 60	60
FIGURA 4.3 ARQUITECTURA DE GESTURE THERAPY. 61	61
FIGURA 4.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS DE NIVEL 0 O DE CONTEXTO 66	66
FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE DATOS DE NIVEL 1 O SUPERIOR 66	66
FIGURA 4.6 INTERFAZ DEL JUEGO STEAK. 68	68
FIGURA 4.7 MENÚ PRINCIPAL DEL SISTEMA. 68	68
FIGURA 4.8 CAPTURA DE PANTALLA DE UNO DE LOS JUEGOS DEL PAQUETE (JUEGO "STEAK"). 70	70
FIGURA 4.9 JUEGO "CLEAN WINDOW" 71	71
FIGURA 4.10 JUEGO "FLY KILLERS" 72	72

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 2.1 EFECTOS PRODUCIDOS POR INFARTO CEREBRAL EN DETERMINADAS ARTERIAS .	15
TABLA 3.1 CRITERIOS QUE DEBEN CUMPLIR JUEGOS DE COMPUTADORA PARA QUE SEAN APROPIADOS PARA SU USO EN REHABILITACIÓN ACORDE A FLORES ET AL.	35
TABLA 3.2 MOVIMIENTOS CORPORALES DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR.	44
TABLA 3.3 TAXONOMÍA DE CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE JUEGOS DE REHABILITACIÓN.	46
TABLA 4.1 MOTORES DE JUEGOS ANALIZADOS PARA ESTE TRABAJO.	58
TABLA 4.2 LA CONFIABILIDAD.	65
TABLA 5.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUJETOS QUE PARTICIPARON EN EL EXPERIMENTO.	77
TABLA 5.2 NORMALIZACIÓN EMPLEADA PARA CADA TIPO DE MÉTRICA DENTRO DE LOS VALORES DEL 0 AL 10.	79
TABLA 5.3 PUNTUACIONES PROMEDIO TOTALES DE CADA JUEGO.	96
TABLA 5.4 PROMEDIOS TOTALES DE CADA JUEGO UTILIZANDO ÚNICAMENTE UN SUBCONJUNTO DE PREGUNTAS DONDE ÉGG CRACKING ES EL MÁS VALORADO.	97

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

GRÁFICA 5.1 CAPACIDAD DE LOS JUEGOS DE PROVEER DE UNA RETROALIMENTACIÓN	81
GRÁFICA 5.2 CAPACIDAD DE LOS JUEGOS DE PROVEER DE UNA RETROALIMENTACIÓN ADECUADA EN TÉRMINOS DE CALIFICAR LA ACTIVIDAD.	82
GRÁFICA 5.3 UTILIDAD DE LOS EFECTOS SONOROS PARA LLEVAR A CABO LAS TAREAS Y OBJETIVOS DE LOS JUEGOS.	83
GRÁFICA 5.4 CONTRIBUCIÓN DE LA MÚSICA AMBIENTAL DEL JUEGO A LA CONCENTRACIÓN..	84
GRÁFICA 5.5 POCOS DE LOS SUJETOS CONCORDARON QUE EN PONG SE REALIZA UNA ACTIVIDAD QUE SE REQUIERA DE VARIOS PASOS PARA COMPLETAR LA ACTIVIDAD.	85
GRÁFICA 5.6 TODOS LOS JUEGOS PRESENTAN UNA COMPONENTE DE REPETICIÓN DE MOVIMIENTOS	86
GRÁFICA 5.7 ENTRETENIMIENTO PROPORCIONADO POR LOS JUEGOS.	87
GRÁFICA 5.8 CAPACIDAD DE LOS JUEGOS DE FOMENTAR UN INTERÉS CUMPLIR CON LA TAREA DE REHABILITACIÓN.	88
GRÁFICA 5.9 EVALUACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LA ACTIVIDAD A LA RECUPERACIÓN MOTRIZ.	89
GRÁFICA 5.10 LA DISPONIBILIDAD A UTILIZAR LOS JUEGOS.....	90
GRÁFICA 5.11 LOS JUEGOS INCORPORAN MOVIMIENTOS UNIDIRECCIONALES	91
GRÁFICA 5.12 EL IMPACTO SOBRE LA MEMORIA DE TRABAJO Y LA MANIPULACIÓN DE LA INFORMACIÓN A NIVEL COGNITIVO.	92
GRÁFICA 5.13EVALUACIÓN DEL ENTRETENIMIENTO PROPORCIONADO POR LA TAREA.	94
GRÁFICA 5.14. LA RELEVANCIA DE LA TAREA	94
GRÁFICA 5.15. LA FAMILIARIDAD DEL PARTICIPANTE CON LA TAREA DENOTA.....	95
GRÁFICA 5.16 PUNTUACIÓN PROMEDIO DE LOS JUEGOS EN AQUELLAS PREGUNTAS DONDE EGG CRACKING OBTUVO UNA MAYOR DIFERENCIA CON PONG.	97
GRÁFICA 5.17 CARACTERÍSTICAS EN LAS QUE NUESTROS JUEGOS TUVIERON UNA BUENA EVALUACIÓN CON RESPECTO AL <i>GOLD STANDART EGG CRACKING</i>	98

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

RESUMEN.

Las malas costumbres alimenticias, la carencia de ejercicio físico o el hábito de fumar, entre otros, son detonantes comunes de afecciones vasculares. Dichas afecciones no sólo deterioran el sistema vascular sino que pueden llegar a afectar a órganos tales como el corazón o el cerebro. En particular, si el riego sanguíneo al cerebro se detiene por un evento vascular esto desemboca en la muerte de las neuronas afectadas y consecuentemente en la pérdida de las funciones controladas por el área afectada del cerebro; el habla, la vista o la motricidad, entre otros. El riego sanguíneo al cerebro se puede detener por un evento vascular que puede ser de origen isquémico o hemorrágico.

Una secuela común entre aquellos que sobreviven a un evento vascular cerebral es una discapacidad motriz, ya sea en las extremidades superiores o las inferiores. La discapacidad motriz tiene consecuencias directas en la actividad diaria de la persona afectada dificultando su capacidad de realizar determinadas actividades cotidianas y en última instancia limitando su independencia. Estas consecuencias pueden extenderse a la familia. Las terapias de rehabilitación motriz facilitan que el paciente recupere total o parcialmente su movilidad. Entre las terapias de rehabilitación motriz existentes, una nueva generación de terapias aprovecha las virtudes que pueden ofrecer los entornos virtuales para asistir al paciente en su recuperación.

Terapia de Gestos (Gesture Therapy su nombre en inglés) es una plataforma de realidad virtual para la rehabilitación motriz de las extremidades superiores. La Terapia de Gestos enmascara los movimientos repetitivos de la terapia en sencillos juegos de computadora que simulan tareas reales de la vida diaria. Hasta ahora, la terapia de gestos ha utilizado juegos desarrollados para otras plataformas de rehabilitación, con el consecuente aprovechamiento sub-óptimo.

Esta tesis tiene por objetivo el desarrollo de un paquete de juegos especializados para rehabilitación que aprovechen al máximo las capacidades de la plataforma de Terapia de Gestos, a la vez que se adhieran a las necesidades específicas necesarias para los juegos usados en terapias de rehabilitación. En este sentido, esta tesis comienza estableciendo una taxonomía de criterios que se deben tener en cuenta durante el desarrollo de los juegos. Delimitados estos criterios, se desarrolla un paquete de tres juegos que abarcan distintos tipos de movimientos de rehabilitación y tienen aplicación en distintos momentos de la terapia. Finalmente, la validez de estos juegos para rehabilitación es puesta a prueba estableciendo el grado de soporte de los criterios establecidos. A este fin, una cohorte de sujetos sanos es expuesta a los juegos desarrollados así como a un juego lúdico pero que ha sido sugerido como potencialmente válido para rehabilitación, y otro juego especialmente diseñado para rehabilitación. Los juegos son evaluados por los sujetos mediante un cuestionario desarrollado ex profeso para calificar los criterios recogidos en la primera parte de este trabajo.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Los resultados obtenidos sugieren que el cuestionario desarrollado es válido en el sentido de que es capaz de discriminar de forma positiva entre un juego orientado a rehabilitación y un juego lúdico. Así mismo, la puntuación obtenida por los juegos del paquete desarrollado en esta tesis es alentadora con todos los juegos puntuando por encima del juego lúdico de control y dos de ellos con puntuaciones muy próximas al juego de rehabilitación pre-existente.

El trabajo desarrollado en esta tesis tiene una aplicación directa en la plataforma de Terapia de Gestos a la que contribuye con un primer paquete de juegos especialmente desarrollados para esta plataforma. Además, esta tesis contribuye a la ciencia con una nueva especificación de criterios de diseño de juegos orientados a rehabilitación y un cuestionario preliminar para evaluar la adherencia de juegos a estos criterios. Las fortalezas y debilidades de dicha especificación y del cuestionario son abordadas en la tesis.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

ABSTRACT.

Bad eating habits, lack of physical exercise or smoking are common risk factors for vascular conditions. Vascular conditions may deteriorate the vascular network and further affect other organs such as the heart or the brain. In particular, if the blood irrigation to the brain stops due to a vascular event, this ends in the death of the affected neurons and consequently in the lost of functions controlled by that brain region; speech, sight, or motility among others. Blood irrigation to the brain may be halted because of a vascular event which can be either ischemic or hemorrhagic.

A common effect among stroke survivors is a motor impairment whether in the upper or lower limbs. Motor impairment has direct impact in the individual's daily life often hindering or completely impeding its ability to carry out daily activities and ultimately limiting his independence. Consequences can further affect his social environment, i.e. relatives. Motor rehabilitation therapies aim to alleviate the impairment. Among existing therapies, a new generation of them take advantage of the benefits that virtual environments can offer in order to assist the patient with his recovery.

Gesture Therapy is a virtual reality-based rehabilitation platform for the upper limb. *Gesture Therapy* conceals the therapeutic repetitive exercise as serious computer games that simulate activities of daily living. So far, *Gesture Therapy* have made use of games previously developed for other rehabilitation platforms (i.e. *Hocoma's Armeo*), and thus exploitation of the platform was sub-optimal.

This thesis has developed a set of serious games for motor rehabilitation and which are specially designed to make the most out of the *Gesture Therapy* platform while ensuring that comply with all major requirements in rehabilitation. This works starts by proposing a new taxonomy of game design criteria that are believed by the community to be necessary for game development in virtual rehabilitation. Keeping into account this taxonomy, three novel games have been developed spanning different movements and supporting different moments of the therapy. Finally, this work attempts to validate the games by assessing the support and coverage that the games do of the design criteria in the taxonomy. In this sense, a cohort of healthy subjects are asked to play the developed games together with two other control games, one especially developed for rehabilitation and another one commercial but adapted to rehabilitation. Game assessment is achieved by means of an especially designed questionnaire.

Results suggest that the questionnaire is a valid assessment tool capable of discriminating among the two control games. Also, scores obtained by the games developed in this thesis is encouraging with all our games scoring higher than the control commercial game, and close to the control rehabilitation game.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

The work carried out in this thesis has a direct application in the *Gesture Therapy* platform, to which it provides an initial package of games. This thesis contribution to science is twofold; a new taxonomy of game design criteria and a valid assessment tool capable of establishing the adherence of games to these criteria. Strengths and weaknesses of the taxonomy and the questionnaire are further discussed in this Thesis.

Capítulo 1

Introducción.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

1.1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente mucha gente es propensa a tener problemas vasculares, ya sean en el corazón, o problemas de hipertensión arterial, debido al estilo de vida y su alimentación. De forma colateral, los problemas vasculares pueden afectar al cerebro. Las consecuencias para el paciente del daño cerebral dependen de la zona cerebral en donde se presente el problema así como del tamaño del infarto. Este daño puede afectar a la motricidad, la parte cognitiva, la visual, el habla, etc.

Comúnmente los sujetos que sobreviven a un infarto cerebral presentan como secuela una deficiencia motriz, ya sea de las extremidades superiores así como en las inferiores. El lado parético depende del hemisferio en donde ocurra el infarto. La discapacidad motriz deja al sujeto incapacitado para realizar muchas actividades de la vida diaria, tanto laboral como social.

A fin de paliar la discapacidad motriz, se han elaborado programas de rehabilitación. Lo que se persigue con estos es la recuperación motriz de forma que el paciente pueda efectuarla mayor parte de las actividades que realizaba antes de que sufrir el percance de forma independiente sin ayuda de terceros. De forma aleatoria, algunos de estos métodos han empleado medicamentos anti-depresivos ya que muchos de los sobrevivientes sufren de depresión post-ictus debido a que se vuelven dependientes de los demás para realizar sus actividades cotidianas. Otras terapias han incluido sustancias que favorezcan a la estimulación muscular. Las terapias más recientes han incorporado avances tanto de la informática como de la robótica para aliviar la carga que supone la terapia tanto para el paciente como para los sistemas de salud.

Esta tesis está enfocada al desarrollo de Juegos Serios (*Serious Games*) para usos terapéuticos dentro de la rehabilitación basada en la realidad virtual para las extremidades superiores. En particular los juegos desarrollados en esta tesis serán parte de una plataforma de *Terapia de Gestos*. Esta plataforma es de bajo costo requiriendo únicamente de una computadora personal de bajas prestaciones, una cámara web y unos controladores desarrollados ad hoc. En este sentido, esta plataforma se diferencia de otras plataformas de rehabilitación que incorporan elementos robóticos, que a menudo resultan bastante costosos para ser considerados económicamente viables en un entorno casero. La *Terapia de Gestos* favorece la ejercitación de los músculos y articulaciones del hombro, brazo y mano de la extremidad afectada.

Uno de los mayores acicates para el uso de juegos serios en las terapias de rehabilitación es la explotación del potencial de estos para elevar la autoestima y motivación del paciente; y consecuentemente favorecer su adhesión al programa de rehabilitación. La mayoría de los sujetos que sobreviven a este tipo de lesiones, por lo regular, necesitan una alta dosis de motivación para el cumplimiento de su terapia, ya que estas suelen ser agotadoras, monótonas y a menudo aburridas.

El desarrollo de juegos serios para rehabilitación comparte muchos elementos con el desarrollo de juegos lúdicos; diseño gráfico y de sonido, control de la física y colisiones, ejecución en tiempo real, etc. Pero además, la particular aplicación clínica impone ciertas restricciones al diseño de

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

estos juegos, y obliga al cumplimiento de ciertas condiciones de forma que los juegos cumplan con su objetivo terapéutico. En este sentido, previo al desarrollo de los juegos como tal, surge la necesidad de crear una metodología o una serie de criterios (taxonomía), los cuales deben de estar contenidos en este tipo de juegos. Estas particularidades deben estar direccionadas en primera instancia hacia el lado terapéutico. Sin embargo, así mismo debemos considerar el aspecto que nos pueda ser de gran utilidad para que los juegos sean atractivos para los sujetos a quienes van enfocados. Para desarrollar esta metodología debemos considerar algunos aspectos del paciente: *su estado psicológico, nivel de deterioro de sus extremidades (superiores), entre otros*, que fueron resultando de este trabajo de investigación.

1.2. SOLUCIÓN PROPUESTA.

Esta tesis desarrolla un conjunto de tres juegos que favorecen movimientos que por lo regular están contemplados dentro de los ejercicios propuestos por un terapeuta en terapias clásicas. El uso de los juegos permite desviar la atención del tratamiento y enfocarla en la consecución de objetivos funcionales.

Además del paquete de juegos, esta tesis propone una taxonomía de criterios de diseño de juegos orientados a la rehabilitación. Los criterios específicos fueron encontrados en la literatura durante la investigación de este trabajo, y fueron estructurados en grupos de la siguiente manera: *Estado inicial, parámetros clínicos de la terapia, motivación/compromiso, repetición de movimientos y sentido/tareas significativas*.

1.3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

1.3.1. Objetivos.

Objetivos Generales.

En primer lugar desarrollar una taxonomía la cual incorpore los criterios que deben de tenerse en cuenta al diseñar y desarrollar juegos enfocados a la rehabilitación de la movilidad de las extremidades superiores. El cumplimiento con estos criterios establece un marco de requerimientos mínimo (condición *sine qua non*) para asegurar la validez terapéutica del juego.

Además, diseñar e implementar un paquete de juegos que cubran las particularidades identificadas en este trabajo para su incorporación a la plataforma de *Terapia de Gestos* [8]. Estos juegos no sólo deben cumplir con los criterios previamente identificados para que auxilien y motiven a los sujetos con déficit motor, sino que además para ajustarse a los principios de la Terapia de Gestos deben poder ejecutarse en computadores de especificaciones bajas favoreciendo su instalación en el hogar y pequeños centros de salud.

Objetivos Específicos.

- Establecer una taxonomía de criterios de diseño de juegos de rehabilitación basados en la literatura de vanguardia sobre desarrollo de juegos serios y terapias de rehabilitación. Los

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

criterios de diseño de juegos no sólo deben cubrir aspectos técnicos sino además aspectos clínicos detonantes de la rehabilitación.

- Diseñar e implementar un paquete de 3 juegos de rehabilitación para la plataforma *Terapia de Gestos*. Estos deben cumplir con los criterios previamente identificados.
- Desarrollar una herramienta de evaluación de adherencia de los juegos a los criterios de diseño.
- Contrastar la validez aparente (*face validity*) de la herramienta de evaluación para medir la adherencia de un juego a los criterios de diseño. En este sentido, el cuestionario deberá tener capacidad de discriminar juegos con validez terapéutica en el sentido de cumplir con los criterios de diseño de juegos de rehabilitación (nótese que el cumplimiento con estos criterios es condición necesaria pero no suficiente), de los juegos meramente lúdicos sin capacidad terapéutica.
- Evaluar la validez de contenido (*content validity*) del paquete de juegos desarrollados en el sentido de ser potencialmente válidos para su uso en terapias de rehabilitación en términos de cubrir una parte representativa del comportamiento en cuestión, léase los criterios de diseño.

1.3.2. Hipótesis.

Los entornos virtuales y en particular los juegos serios ya han demostrado su capacidad de formar parte de terapias de rehabilitación motriz. Los juegos serios aplicables a las terapias de rehabilitación motriz deben cumplir con los pilares de la rehabilitación: favorecer la repetición de movimientos, garantizar la funcionalidad de las tareas de rehabilitación, proveer de retroalimentación a paciente y terapeuta, y mantener altos niveles de motivación que garanticen la adhesión del paciente al programa de rehabilitación. No obstante, la incorporación de estos juegos, representantes de los entornos virtuales, a las terapias de rehabilitación han sido complementos de plataformas de rehabilitación de muy diversas características; algunos de ellas combinadas con elementos robóticos, otros aprovechando el potencial de las consolas de juegos comerciales, e incluso algunos de ellos como parte integral de plataformas de rehabilitación cuyo principal componente es la propia realidad virtual. En este sentido, aún existen muchas dudas de cuáles son los elementos cruciales que determinan la capacidad terapéutica de un juego serio.

Partiendo de la premisa que la investigación en el campo ha sentado las bases mediante las cuales los juegos serios son capaces de cubrir las necesidades de rehabilitación anteriormente mencionadas, esta tesis trabaja bajo la hipótesis de que (i) es posible estructurar dichas bases en forma de criterios de diseño y desarrollo de juegos, y (ii) es posible desarrollar juegos serios para rehabilitación que cumpliendo con dichos requerimientos, no demanden ni un proceso de desarrollo e implementación complejos o costoso, ni un hardware capaz de ejecutarlos con un costo prohibitivo. Las implicaciones de esta hipótesis son claras; el desarrollo de juegos serios para rehabilitación puede trivializarse, y las terapias basadas en realidad virtual pueden aumentar su impacto.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

1.4. TERAPIA DE GESTOS (*GESTURE THERAPY*).

La terapia física clásica enfatiza la práctica de movimientos aislados, cambiando de un tipo de movimiento a otro de forma repetida, y ensayando movimientos complejos que requieren una alta dosis de coordinación y balance [2]. Recientemente, en este tipo de terapias se ha empezado a enfatizar la eficacia de que estos movimientos sean llevados a cabo en actividades funcionales con un claro objetivo.

La *Terapia por Gestos (GT* por sus siglas en inglés) es una idea innovadora basada en realidad virtual que enmascara la terapia física bajo una serie de sencillos juegos de computadora, los cuales contienen ejercicios que son a menudo contemplados dentro de un tratamiento tradicional. Esta idea básica es engañosamente sencilla; la realización de los movimientos de rehabilitación bajo un entorno virtual controlado conlleva ciertas implicaciones, ventajas e inconvenientes [72]. *GT* no tiene la necesidad de muchos recursos ya que solo se emplea un ordenador personal con cámara web y un controlador [69]. Actualmente existen dos controladores; uno para rehabilitación del brazo que contiene una esfera en la parte superior para el sistema de seguimiento de movimientos así como un sensor de presión para la medición de potencia que le imprima el sujeto, y otro para la rehabilitación de los dedos, que aún se encuentra en fase de pruebas.

GT es una plataforma especialmente diseñada con un bajo costo con el objetivo de que pueda ser utilizada en el hogar del paciente. Como plataforma de rehabilitación basada en realidad virtual, *GT* comparte con otras plataformas similares la idea de encapsular los movimientos de rehabilitación de una terapia física en un entorno virtual controlado como lo son los juegos. *GT* se distingue de sus contrapartes aspectos tales como el diseño único de sus controladores, y el uso extensivo de técnicas de toma de decisión para guiar la terapia.

Al inicio de esta tesis, la plataforma *GT* carecía de un paquete de juegos propios. En este trabajo de tesis, *GT* es una parte central debido a que los juegos que se han desarrollado son finalmente para esta plataforma. Anteriormente *GT* empleaba un conjunto de juegos desarrollados por la compañía *Hocoma* para su plataforma *ARMeo*. Por esta razón, surge la necesidad del desarrollo de juegos propios que exploten al máximo las características propias de la plataforma.

1.5. CAMPO DE APLICACIÓN O DOMINIO.

El dominio de aplicación son los ambientes virtuales enfocados a la rehabilitación y en particular en personas que han sufrido un ataque cerebro-vascular. La prevalencia de las enfermedades cerebrovasculares acorde a la *American Heart Association* [48] es de un 11% entre los 55 y los 64 años de edad, aumentando progresivamente hasta el 43% en los mayores de 85 años. Afecta más a los de raza negra (4%), que a los hispanos (2.6%), caucásicos (2.3%) o asiáticos (1.6%). La incidencia es mayor en hombres que en mujeres a edades tempranas, pero esta diferencia desaparece a edades mayores.

Actualmente, a las edades a las que la prevalencia de la enfermedad es alta, la mayoría de esta población no está familiarizada con la utilización de un ordenador y por ende tampoco con los

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

juegos. En este sentido se puede hacer la cruda generalización de que a los adultos mayores (51 años en adelante) les cuesta un poco de trabajo asimilar como las nuevas tecnologías les pueden ser una propuesta más como herramienta para su recuperación. Lo anterior es un reto a la hora de llevar las nuevas terapias basadas en realidad virtual a los sectores de la población más afectados.

Añadido a este reto, la aportación que muchas de las nuevas tecnologías pueden hacer al campo de la neuro-rehabilitación se ve en parte limitada por el coste final de las plataformas que incorporan estas innovaciones. En el caso de esta tesis, la plataforma final presume como una de sus señas distintivas el bajo coste de la misma, ya que está pensada para su uso en el hogar del paciente y/o pequeñas clínicas y centros de salud, y en general para ser accesible en países de ingreso medio o bajo, incluyendo México.

1.6. CONTRIBUCIONES A LA CIENCIA.

Las contribuciones a la ciencia que se derivan de este trabajo son las siguientes:

1. Un conjunto de criterios, basados en la literatura de este campo, que pueden ayudar como punto de partida para la generación de una taxonomía adecuada para el diseño de juegos serios orientados a rehabilitación.
2. Un conjunto de juegos para la plataforma *GT*. La implementación de estos juegos ejemplifica el proceso de creación de este tipo de sistemas complaciente con los pilares de la rehabilitación y los criterios de diseño anteriormente recolectados.
3. La elaboración de un cuestionario que permite emitir una valoración de juegos para rehabilitación de acuerdo al conjunto de particularidades. En otras palabras es posible cuantificar el grado de compatibilidad de los juegos con los criterios de diseño.
4. El diseño y ejecución de un experimento orientado a evaluar la validación aparente del cuestionario y la validación de contenido de los juegos. La validación aparente del cuestionario en términos de su capacidad discriminatoria entre un juego específicamente desarrollado para su incorporación en una plataforma de rehabilitación motriz (*ARMeo*), y un juego originalmente lúdico (*Pong*) y que se ha adaptado para su uso en rehabilitación.

1.7. EVALUACIÓN.

En este trabajo de investigación implementó un paquete de juegos para su uso en terapias de rehabilitación de las extremidades superiores. Los juegos incorporan los desplazamientos utilizados en un tratamiento tradicional ayudando en el fortalecimiento del lado afectado, además de contribuir en el control de dichos movimientos por medio de la coordinación de los músculos que llevan a cabo el desplazamiento. Estos juegos fueron desarrollados por medio de software especializado para la creación de estos sistemas (motor de juegos).

Para el desarrollo de nuestro sistema elaboramos una taxonomía que fue de gran utilidad al momento de crear nuestro paquete de juegos. Esta se elaboró por medio de una investigación de la literatura científica enfocada al área de rehabilitación basada en realidad virtual. Se fueron recabando cada uno de los criterios los cuales fueron incorporados en la taxonomía propuesta.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Se realizó una evaluación cualitativa de este tipo de herramientas observando las características de cada uno de ellas. Así mismo se fueron empleando uno por uno en un tiempo definido descubriendo así los beneficios que ofrecían. Finalmente, se escogió *Torque Game Builder* [24] debido a que se acomodaba a nuestras necesidades de desarrollo.

Para la evaluación de los juegos se elaboró un cuestionario que cuantifica la adhesión de un juego a los criterios de diseño propuestos. En un experimento llevado a cabo en el INAOE se estableció, por una parte, la validez del cuestionario para discriminar juegos aceptables para rehabilitación mediante la comparación de los resultados de un juego lúdico contra otro específicamente diseñado para rehabilitación, y por otra parte la validez de los juegos aquí desarrollados como parte de una terapia de rehabilitación. La cohorte empleada fueron 18 sujetos sanos. La elección de una cohorte sana sobre una cohorte de pacientes con infarto cerebral viene justificada por el temprano estado de la investigación. Al igual que los fármacos son probados en modelos animales antes de pasar a pruebas con humanos, la prueba con una cohorte sana en esta etapa temprana de la investigación permite obtener unos resultados preliminares indicativos de lo apropiado del cuestionario y de los juegos sin poner en peligro la rehabilitación de un paciente real. Al igual que en la investigación farmacológica, los resultados en modelos animales tienen su relevancia pero no son directamente extrapolables a humanos, en nuestro caso, las conclusiones obtenidas de nuestro experimento son valiosas si bien su extrapolación a pacientes reales de infarto cerebral no es directa.

La investigación llevada a cabo en esta tesis es de carácter multidisciplinaria. Contiene aspectos técnicos de desarrollo de software pero también incorpora aspectos clínicos. Se espera por tanto que la valoración de la misma sea de carácter holístico, donde el resultado final pese más que los aspectos individuales. Colateralmente, durante el transcurso de este trabajo he aprendido:

- A buscar, identificar, y criticar literatura científica apropiada.
- A familiarizarme con el método científico clásico de observación de un fenómeno, emisión de hipótesis, prueba de hipótesis de forma experimental y confirmación o rechazo de la hipótesis.
- A diseñar y llevar a cabo un experimento clásico con elementos de control y aleatorización. Así mismo se han conocido algunas de las implicaciones de trabajar con humanos.
- Técnicas de análisis estadístico principalmente de tipo descriptivo.
- A redactar documentos de carácter científico con las particularidades que ello conlleva.

1.8. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.

El capítulo 2 recoge los antecedentes, el trabajo relacionado y la vanguardia de la investigación en el campo de terapias de rehabilitación basadas en técnicas robóticas y de realidad virtual. Esta revisión literaria incluye tanto aspectos de la parte médica así como algunos proyectos que se han desarrollado. En la parte médica, se describe en qué consiste un ataque cerebro-vascular (ictus), los tipos que existen y que sistemas del cuerpo pueden ser dañados dependiendo de la zona y el

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

tamaño de la lesión. También se tratan los tipos de terapias que se han empleado para rehabilitar sujetos que han sobrevivido a este tipo de problemas neurológicos, y se describen algunos sistemas de rehabilitación.

En el capítulo 3 se revisa el conjunto de criterios que ya se han propuesto en trabajos anteriores, y que se tomaron como un punto inicial para poder elaborar nuestra taxonomía. A continuación se hace una propuesta taxonómica del conjunto de criterios de diseño de juegos orientados a la rehabilitación.

El capítulo 4 recoge los aspectos técnicos del desarrollo de los juegos. Se describen brevemente diversos entornos que se han utilizado en la creación de juegos y se justifica la elección de *Torque Game Builder*. A continuación se describe detalladamente los aspectos de *Torque* de manera que se entienda el funcionamiento de esta herramienta. Finalmente, se presenta el análisis y diseño de los juegos desarrollado por nosotros, así como los aspectos críticos de su implementación.

El capítulo 5 resume el experimento realizado en las instalaciones del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica para la validación aparente del cuestionario y la validación de contenido de los juegos. Se describe la metodología seguida; observaremos su planteamiento, sus limitaciones, y las incidencias que fueron surgiendo en el transcurso. Posteriormente se presentan los resultados. Indicaremos en cuales criterios de nuestro marco, se denota una gran diferencia entre cada uno de los juegos.

Finalmente el capítulo 6 recoge las conclusiones de este trabajo. Se planteará también el trabajo futuro que se pretende realizar para que esta investigación siga evolucionando.

Capítulo 2 . Antecedentes.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

2.1. INTRODUCCIÓN.

Entre las consecuencias más comunes del infarto cerebral se encuentra la discapacidad motriz. Frecuentemente los sujetos pierden la motricidad de un solo lado del cuerpo dependiendo del hemisferio en donde pueda acontecer el episodio cerebrovascular, y esta a menudo afecta a las extremidades. En particular, esta tesis se enfoca a la rehabilitación de las extremidades superiores (brazos, muñecas y mano).

Existe un amplio rango de terapias disponibles para paliar el deterioro de la función motora, algunas de ellas específicamente diseñadas para atender a las extremidades superiores. En este capítulo se describen algunas de las escuelas de pensamiento que han tenido gran impacto en la implementación de terapias. Así mismo, se describen algunos dispositivos y plataformas existentes para asistir a las terapias de rehabilitación actuales. Entre las soluciones existentes las hay algunas que enfatizan la realización de movimientos repetitivos, otras buscan implementar determinadas estrategias de movimiento, hay soluciones que estimulan los músculos mediante el empleo de fármacos y soluciones que se respaldan en los adelantos tecnológicos, por ejemplo, robóticos o de realidad virtual. Entre estas últimas, las terapias basadas en realidad virtual utilizan ambientes virtuales en los que se puede mimetizar algún lugar o situación real. Una de las ventajas de este tipo de solución es la de proveer de un entorno de entrenamiento seguro para el paciente; por ejemplo, se puede re-entrenar tareas de cocina sin el riesgo de quemaduras. El capítulo se completa con una descripción de la plataforma de Terapia de Gestos, central para esta tesis.

2.2. INFARTO CEREBRAL.

Un infarto cerebral es causado por la falta de suministro sanguíneo en alguna parte del cerebro [76]. Existen 2 tipos de infartos los cuales son: *hemorrágico*, *isquémico*. El hemorrágico consiste en la ruptura de un vaso sanguíneo por un exceso de bombeo de la sangre hacia el cerebro. Este produce la inundación de un área del cerebro formando un hematoma [76]. En el *Isquémico* se forma un trombo que obstruye alguna arteria impidiendo el flujo sanguíneo, y consecuentemente haciendo que al cerebro no le llegue el suficiente oxígeno. A su vez, dependiendo de donde se origina el coágulo este tipo de infarto cerebral pueden suceder de dos maneras; *trombótico* si el coágulo se origina dentro del cerebro, y *embólico*, cuando el coágulo fuera del cerebro, principalmente en el corazón [77]. En este último caso, el coágulo viaja a través del torrente sanguíneo bloqueando las arterias más estrechas.

La obstrucción o ruptura del vaso sanguíneo conlleva el deterioro del suministro de oxígeno a una región encefálica, ocasionando la muerte de células cerebrales. Los principales factores que determinan la gravedad de la lesión son el tamaño en la región cerebral afectada y el tiempo de duración antes de que se restablezca el riego sanguíneo [77]. Las consecuencias pueden ser permanentes o parciales [76]. La Tabla 2.1 muestra un breve resumen de las secuelas que pueden ocasionarse una vez sobrevivido a un accidente cerebrovascular en algunas de las vías sanguíneas principales.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Vaso sanguíneo.	Efecto.
Arteria cerebral anterior.	Pérdida de sensibilidad y fuerza en las extremidades inferiores.
Arteria carótida interna.	Deterioro de conciencia.
Arteria cerebral media.	Parálisis de brazo y de cara, pérdida de visión y/o si ocurre del lado izquierdo trastorno del habla (afasia).
Arterias basilar y vertebral.	Somnolencia, estupor, coma si la lesión ocurre en la parte más baja del tronco del cerebro. Además si se daña el cerebelo puede producir vértigo y dificultad al hablar, así como problemas de la marcha.

Tabla 2.1 Efectos producidos por infarto cerebral en determinadas arterias [77].

Las secuelas de un infarto cerebral son desalentadoras. La persona que sobrevive al infarto cerebral a menudo pierde su capacidad de realizar ciertas actividades de la vida diaria y con ello su independencia de terceros. En las terapias de rehabilitación a menudo se enfatiza la necesidad de mejorar la capacidad de realizar tareas de la vida diaria (ADL por sus siglas en inglés). A continuación se hace una revisión de algunos métodos de rehabilitación que han tenido mayor influencia.

2.3. TERAPIAS.

Una terapia de rehabilitación, consiste en un conjunto de ejercicios que contienen una serie de movimientos básicos que son establecidos por expertos dentro del área, alcanzando la recuperación gradual de los miembros (inferiores o superiores).

Las secuelas de un infarto cerebral no sólo son de carácter físico, sino a menudo también incluyen una componente psicológica. La recuperación tiene un costo no sólo económico sino además social. Por esta razón, surge la necesidad de crear un tratamiento de rehabilitación el cual busque coadyuvar a la recuperación de manera rápida y natural aminorando la probabilidad de causar algún daño físico o dolor.

Algunos aspectos que se deben tomar en cuenta para obtener resultados favorables son [26]:

1. *Tipo de terapia.* Se pueden contemplar dos tipos de terapias.
 - *Interdisciplinaria.* Varios especialistas forman un equipo dando cada uno de sus integrantes un punto de vista del problema para así administrar una serie de ejercicios. Se comunican constantemente y se reúnen para observar los resultados, regularmente se forman una meta en común.
 - *Multidisciplinaria.* De la misma forma a la anterior, nada mas aquí cada especialista da un punto de vista más exacto de la solución al problema; es decir, proporcionan una idea en base a su conocimiento de su área y tratan de implementarlo en la solución. Una gran desventaja de este tipo de terapias es la comunicación entre el equipo de trabajo.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

2. *Ventana de oportunidad.* La ventana de oportunidad hace referencias al tiempo que por lo regular los especialistas recomiendan para empezar a implementar el tratamiento. El plazo para comenzar la terapia oscila entre los 3 y los 30 días siguientes al infarto, pero el momento óptimo sigue causando controversia [64]. El momento más crítico para aprovechar al máximo la plasticidad cerebral es durante la fase aguda posterior al infarto, pero en ese momento el paciente por lo general se encuentra demasiado débil para llevar a cabo los ejercicios de rehabilitación, y por tanto la implementación de una terapia tan temprana es a menudo impráctica [65]. Es más, el ingreso a una terapia de rehabilitación excesivamente temprano puede dañar células vulnerables en la penumbra por estrés oxidativo y/o metabólico [64].
3. *La intensidad y duración de la terapia.* La evidencia sugiere que dosis más altas de tratamiento conllevan a una mejor recuperación [41]. Desafortunadamente, la rehabilitación puede requerir de cientos de repeticiones para que el progreso del paciente sea observable [29] y sin embargo una sesión típica con un terapeuta sólo incluye un número reducido de repeticiones [10].
4. *Especificidad del tratamiento.* Asociados entre las terapias ocupacionales y/o fisioterapia. Los datos sugieren que los efectos son específicos y se limitan en gran medida al entrenamiento en específico. La repetición de movimientos por sí sola es insuficiente para promover la reorganización funcional; es necesario que la práctica repetida este basada en una mejora incremental en una tarea u objetivo [51].

Se han desarrollado diversos métodos para la rehabilitación y estos son: *técnicas de compensación, técnicas de facilitación y técnicas con enfoques modernos*. En esta última, la técnica que destaca más es el reaprendizaje orientado a tareas [27].

2.3.1. Técnicas de compensación.

El objetivo principal de esta técnica es utilizar las partes residuales del cuerpo; en este caso, el hemisferio no afectado. Las técnicas de compensación pretenden re-educar a la persona para que realice los movimientos necesarios para cumplir con el propósito de la actividad utilizando de alguna forma su extremidad no afectada, y equilibrar el movimiento. Algunas escuelas no están de acuerdo con este tipo de métodos, por ejemplo *Bobath* está en desacuerdo con esta metodología porque no promueve la recuperación de la parte afectada [27].

2.3.2. Técnicas de facilitación.

Desarrolladas en los 40s, el objetivo principal de estas técnicas son la de mejorar la calidad de movimiento del paciente. Se basa en la estimulación en el principio de cada acción realizada por el Sistema Central Neuronal a través de diversa información sensitivo motora, dando la pauta a poder influir los movimientos por medio de distintos estímulos como táctiles, visuales, etc. Estos tratamientos neuromusculares han tenido un gran impacto y se siguen utilizando en la actualidad. Entre este tipo de técnicas existen entre otras las siguientes escuelas: *Abordaje de Rood, Terapia de neurodesarrollo (Bobath), Terapia de movimientos de Brunnstrom y Facilitación neuromuscular*.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Abordaje de Rood.

Fue creada por Margaret Rood. Su idea central consiste en la estimulación sensorial para obtener una respuesta muscular. Se trabaja en la tonificación de los músculos afectados a fin de conseguir la flexión/extensión deseada. Esta técnica está enfocada al empleo de segmentos corporales que son controlados de manera cortical como: el tronco, miembros superiores e inferiores. Esta técnica no ha demostrado su efectividad en pacientes con un alto grado de discapacidad [22].

Terapia de neurodesarrollo de Bobath.

Este sistema fue creado en los 40s por Bertha y Karol Bobath [27]. Este método trata de corregir la postura de la persona y algunas alteraciones motoras. El objetivo es combatir la espasticidad en los músculos, que surge a partir de la falta de un mecanismo de inhibición postural en el paciente [78]. Los pilares principales de Bobath son *la disminución de la espasticidad, sinergias y muestras de movimientos anormales, desarrollar una guía de desplazamiento y postura apropiada mediante técnicas de inhibición, utilizar la parte con hemiparálisis en todas las actividades, restaurando la simetría de movimiento.*

La espasticidad se combate por medio de posturas inhibidas mediante movimientos lentos realizados de forma opuesta de la espasticidad [28]. Esto ayuda al fortalecimiento de los músculos débiles para conseguir la flexión/extensión deseada y poco a poco ir recuperando la movilidad de la persona.

Terapia de movimientos de Brunnstrom.

Creado en los 50's por Signe Brunnstrom. Este observó los cambios de posición de las articulaciones de sus pacientes en respuesta a los estímulos. Mediante sinergias se busca el control del movimiento en la extremidad afectada a través de trabajo que auxilien en el fortalecimiento muscular [28]. Entre otros pilares de este método se incluyen [27] los reflejos acentuados, y los laberintos (reacciones en la que se mantiene la cabeza y el cuello en alineación con el tronco [78]) similar a la terapia de neurodesarrollo de Bobath.

Facilitación neuromuscular.

Fue creado en la década de los 40's por el Dr. Kobot. Este método se centra en la aplicación de estímulos periféricos tanto superficiales (mediante el tacto) como profundos (posición articular y extensión de músculos y tendones) para impulsar el fortalecimiento y coordinación en los músculos [27]. Se pretende que la función motora se reorganice de una representación subcortical, a una representación cortical. Para generarlos movimientos se realiza una agrupación del conjunto de músculos involucrados en su realización. Los objetivos que pretende este método son los siguientes [27]:

- El fortalecimiento muscular por medio de contracciones repetidas, transposiciones lentas, etc.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- Coordinación en los movimientos elaborando iniciación rítmica.
- Equilibrio realizando estabilizaciones rítmicas.
- Relajación (Tensión – Relajación, contracción – relajación).
- Reforzar respuestas motoras.

De manera similar al método de Bobath, se pretende evitar que el sujeto compense en los movimientos utilizando partes sanas del cuerpo.

Entre estas técnicas de facilitación, la técnica más aceptada es la de Bobath, siendo la más utilizada en varios países actualmente. Esto se debe quizás a que no necesariamente se lleva un estricto régimen en su aplicación, sino se adapta a las necesidades de cada paciente.

2.3.3. Enfoques Modernos.

Los enfoques modernos surgen tomando como base el método de Bobath. Lo que pretenden estos, como su antecesor, es re-educar a la persona en su movilidad, pero utilizando diversas formas como el uso de la tecnología, además de explorar algunos medicamentos como anti-depresivos y placebos para combatir la depresión post-ictus motivo principal por el cual se resiste la persona en la administración de un tratamiento para su recuperación. Por otro lado, también se ha intentado aprovechar la plasticidad del cerebro; es decir, la reorganización cerebral para poder recuperar la conexión perdida entre el cerebro y la extremidad afectada. Bajo este encabezado se agrupan varios métodos:

Plasticidad Post-Ictus.

La reorganización funcional subsiguiente a un infarto cerebral sigue distintas estrategias dependiendo de la localización y alcance de la lesión. No obstante la reorganización hacia zonas de la penumbra, o la reorganización de funciones motoras al hemisferio sano son estrategias frecuentes [12, 9]. Además hay evidencia de que es posible influir en la reorganización a través de la terapia [37].

El objetivo es que, mediante el aprovechamiento de la plasticidad cerebral, la persona recupere conexiones neurológicas que ha perdido a causa de la lesión a través de la repetición constante de ejercicios con la parte afectada de manera que se fortalezca el enlace neuronal perdido entre la parte afectada y el cerebro. En este sentido, se ha observado en monos que si utilizan tres dedos de alguna de sus manos constantemente para realizar todas sus actividades, el vínculo entre el cerebro y los dedos que maneja periódicamente se empieza a reforzar y la representación cortical de estos dedos en el cerebro aumenta [27]. De forma análoga, este método suprime el lado sano, para forzar que los movimientos se lleven a cabo con el lado afectado. El uso frecuente del lado afectado debe conllevar a un refuerzo de la representación cortical del miembro afectado, tal y como ocurre con los simios [19].

Re-aprendizaje motor orientado a tareas.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Este método fue creado por Janet Carr y Robert Shepherd en 1984 basándose en avances de neurofisiología y aprendizaje. El objetivo de este tipo de tratamiento es “desarrollar estrategias para la elaboración de movimientos con la parte afectada” y “forzar al individuo a utilizar la parte afectada para no generar habilidades indeseadas” [27]. El re-entrenamiento se hace mediante tareas con un objetivo específico que el paciente debe realizar siguiendo instrucciones precisas dadas previas a la realización de la tarea, pero con mínima ayuda por parte del terapeuta durante la ejecución.

Terapia inducida mediante la restricción del lado sano.

Esta terapia fomenta que la persona utilice la parte afectada, para que recupere la motricidad en la extremidad lesionada, suprimiendo la movilidad en el lado saludable. El especialista inmoviliza la parte que no se desea que se utilice, obligando al sujeto a utilizar la parte afectada. La aplicabilidad de este método viene limitada por la presencia de discapacidades cognitivas en el paciente o por discapacidades matrices severas.

Hasta hace poco, esta era la única terapia para la que se había observado una reorganización cortical.

2.3.4. Estimulación sensitivo-motora asistida por robots.

En una nueva generación de terapias de rehabilitación, la ejecución de los programas de la terapia es asistida por robots. En este tipo de tratamientos se utilizan dispositivos robóticos para auxiliar al individuo a llevar a cabo los movimientos. Al igual que en otros métodos, se pretende que el paciente pueda realizar las actividades satisfactoriamente por sí mismo sin ayuda de terceros.

Los dispositivos más comunes para la extremidad superior en este tipo de terapia son, o bien un brazo robótico, o bien, un guante de datos. Datos típicos monitoreados incluyen la velocidad de ejecución del movimiento, la posición del brazo o la mano o la fuerza desarrollada, entre otros. Los datos recabados permiten al terapeuta evaluar el rendimiento y la calidad de los movimientos y en consecuencia dar retroalimentación al paciente. A menudo este tipo de sistemas incluye una parte software que se encarga de proveer las instrucciones para la realización de la tarea, el almacenamiento de la información, y su presentación. Este tipo de terapia favorece una excelente retroalimentación por medio de sonidos y mensajes en pantalla.

Similar a lo que ocurre en programas de terapia física clásica, los ejercicios que se ocupan en las terapias asistidas por robots deben de cubrir patrones de movimientos preestablecidos. Estos son una serie de combinaciones de desplazamientos que ayudan a conseguir un alargamiento máximo de grupos musculares [62].

Entre las ventajas que ofrecen las terapias asistidas por robots es llevar un mejor control del progreso del individuo mediante el monitoreo de los datos. Además, la dificultad en las tareas se puede ir incrementando conforme al rendimiento. A continuación presentamos algunos de los sistemas de rehabilitación robóticos existentes.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

T-WREX.

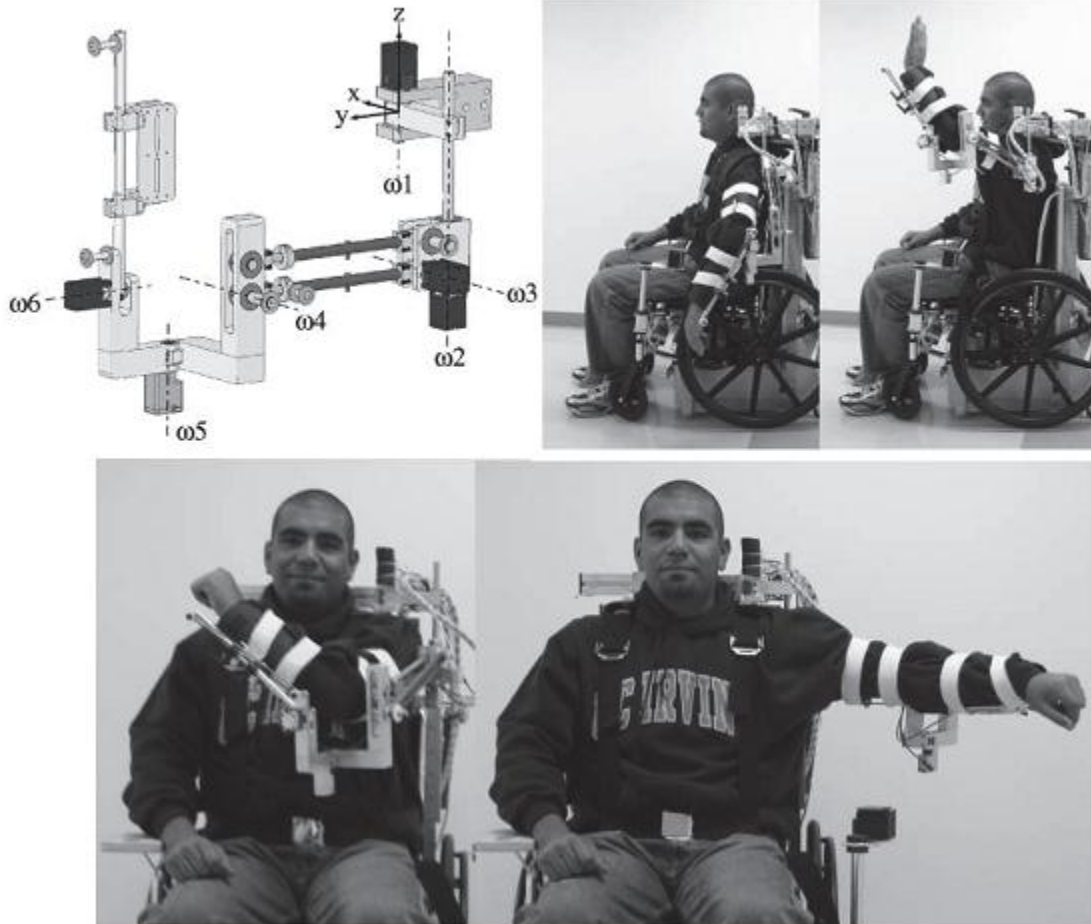


Figura 2.1 Componentes del dispositivo de T-Wrex y como da soporte a la extremidad afectada del paciente [63].

El *Therapy Wilmington Robotic Exoskeleton (T-Wrex)* es un aparato ortopédico anti gravitatorio para el brazo diseñado para personas sobrevivientes de un ataque cerebrovascular y tienen debilidad en la extremidad afectada. El espacio de trabajo que ofrece *T-Wrex* es en 3D. Este dispositivo robótico en dos uniones; una para el antebrazo y una en forma de paralelogramo para la parte superior del brazo, también cuenta con una serie de cintas elásticas para equilibrar el balance de gravedad en la parte superior e inferior del brazo dando un soporte en todas las direcciones del espacio de trabajo (Figura 2.1). Estas cintas pueden ser ajustadas por el terapeuta, dependiendo del grado de soporte que necesite el paciente. Sensores de posición se añadieron a cada conjunta y un sensor de presión en la manija diseñado para la mano. Además cuenta con un potenciómetro rotatorio compacto (Midori America, CP-2FB (b)) para el hombro, codo y antebrazo. El diseño de la estructura de *T-Wrex* está basado en el diseño de *Wilmington Robotic Exoskeleton (WREX)* del Dr. Tariq Rahman [34]. El *WREX* fue desarrollado para niños con debilidad neuromuscular, siendo des-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

pués modificado para personas adultas en el laboratorio de biomecatrónica de la Universidad de Irvine California llamando después al sistema *T-WREX* [34].

Por otro lado, los juegos fueron diseñados para responder a los movimientos del paciente. En primeras versiones de *T-WREX* se empleaba el software de *Java Therapy* 1.0 y 2.0. Sin embargo el paquete de juegos se ha ido actualizando. Además los juegos que se han desarrollado para este sistema han sido pensados para que estos sean intuitivos para el paciente con problemas cognitivos mínimos o déficit perceptual.

ARMEO.

Armeo [1] es la réplica comercial del exoesqueleto *Assisted Rehabilitation and Movement (ARM) Guide* desarrollado en el laboratorio del Dr. Reinkensmeyer [15]. El sistema *Armeo* es un exoesqueleto que ofrece un soporte con distintos niveles de gravedad para el brazo afectado. El sistema se complementa con un entorno virtual donde las tareas de rehabilitación se llevan a cabo mediante diferentes juegos. *Armeo* contiene distintos sensores de presión para la interacción entre el sujeto y el entorno virtual. El sistema ofrece 5 grados de libertad: 3 en el hombro, 1 en el codo y 1 para el antebrazo con un espacio de trabajo tridimensional. El tipo de software que utilizan es una serie de juegos que simulan circunstancias reales, que provee de una retroalimentación tanto auditiva como visual durante el transcurso de la actividad [30]. Hasta el trabajo desarrollado en esta tesis la plataforma de terapia de Gestos, utilizaba para su utilización el conjunto de juegos de esta plataforma. Debido a su alto costo, este sistema no está orientado a la rehabilitación en el hogar. De este sistema existen 3 variantes: *ARMeo Spring*, *ARMeoBoom* y *ARMeo Power* para personas adultas (Figura 2.2). Y existe *ARMeo Spring Pediatric* desarrollado para niños con discapacidad motriz en sus extremidades superiores por causas neurológicas [1].



Figura 2.2 Distintas variantes de *ARMeo*; en la primera imagen esta *ARMeo Power*, en la segunda esta *ARMeo Spring* y la tercera es *ARMeo Boom*.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.



Figura 2.4 Movimiento unilateral con MIME.

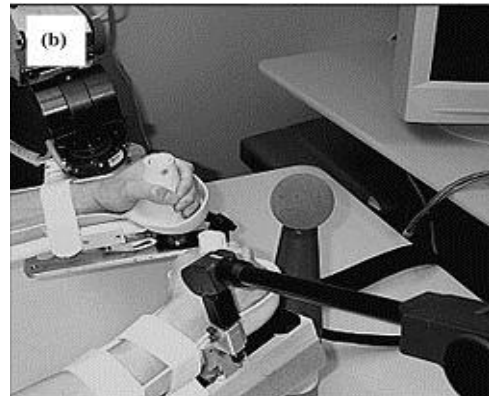


Figura 2.3 Movimiento bilateral con MIME.

Mirror Image Motor Enable (MIME).

Este sistema se enfoca a la neurorehabilitación del hombro y codo en sujetos que han padecido problemas cerebrovasculares agudos [11]. El sistema actual es la evolución a través de varios prototipos hasta llegar al modelo actual. Este dispositivo dispone de un manipulador robótico (PUMA 560, Stabl Unimation Inc., Duncan, South Carolina) que sirve como soporte durante el tratamiento (Figura 2.4) [57]. Además de un sensor de 6 ejes para la evaluación de la extremidad afectada. Este sistema permite 4 distintas modalidades de asistencia que son [57]: *pasivo*, donde el robot es responsable de llevar a cabo el movimiento, *asistencia activa*, en la que el robot completa un movimiento iniciado por el paciente, *contracción activa*, por la que el robot ejerce una ligera fuerza opuesta al movimiento, y *bilateral* donde es el brazo sano del paciente el que guía al brazo discapacitado con desplazamientos simétricos (Figura 2.3). El sistema no está pensado para su uso en el hogar.

Lum et al [57], realizaron una comparación entre el sistema MIME y una terapia convencional. Los resultados que obtuvieron pasado los 2 primeros meses del tratamiento fueron estadísticamente significativos demostrando un aumento en la escala Fugl-Meyer. Los beneficios se observaron en la fuerza en las articulaciones. No obstante, este beneficio no persistió pasados 6 meses.

Haptic Knob.

El sistema *Haptic Knob* es un pequeño robot con 2 grados de libertad para el reentrenamiento de la mano. Permite entrenar movimientos de apertura y cierre de la mano, así como rotación (pronación/supinación) de la muñeca (Figura 2.5). El sistema cuenta con 4 sensores de fuerza para monitorear el avance del paciente, e incorpora una serie de medidas de seguridad. [42]. Los niveles de carga se pueden adaptar colocando más resistencia en el dispositivo obligando al paciente a emplear mayor fuerza. La ventaja que ofrece es su adaptabilidad en cualquier lugar debido a sus dimensiones ($60 \times 30 \times 25 \text{ cm}^3$). Gracias a su pequeño tamaño y bajo coste el paciente puede realizar

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

sus ejercicios en su hogar. El ensayo clínico preliminar arrojó un incremento de unos 5 puntos en la escala Fugl-Meyer en 5 de 9 sujetos [42].

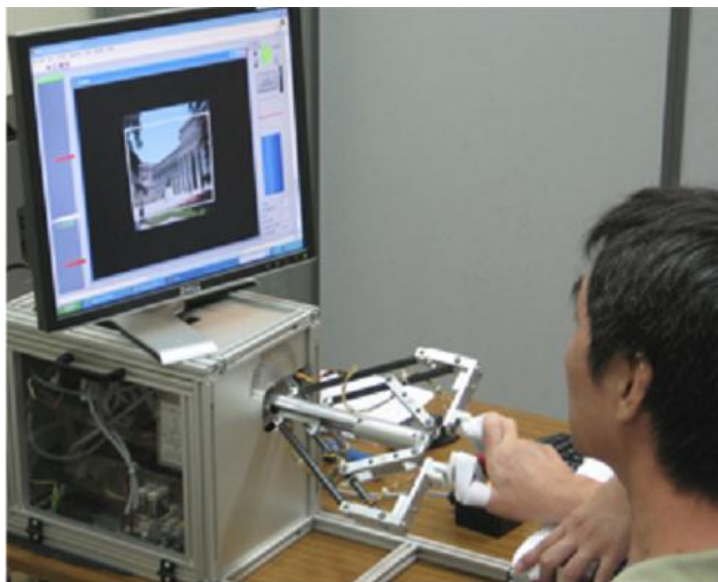


Figura 2.5 Un paciente emplea el *Haptic Knob* para el fortalecimiento de la muñeca.

2.3.5. Terapias basadas en realidad virtual.

En los últimos años la realidad virtual ha tenido diversas aplicaciones, como por ejemplo en la aviación, en el entretenimiento, entre otros. Otro campo en donde se ha utilizado es en la rehabilitación. La literatura a menudo repite una serie de ventajas de este tipo de terapias [72]. Entre estas podemos destacar: (i) validez a la hora de cumplir con los pilares de la rehabilitación (repetición, retroalimentación, motivación y ejercicios orientados a la tarea), (ii) su adaptabilidad a las necesidades de paciente y el progreso de la terapia, (iii) su baja demanda de supervisión clínica, (iv) su capacidad de incorporar o retirar distractores de la escena, (v) fácil desarrollo y bajo coste, y (vi) su capacidad para favorecer la estandarización de la evaluación y protocolo de tratamiento. Con respecto a la retroalimentación, la realidad virtual provee de un espacio privilegiado para responder con varias modalidades de retroalimentación, tanto en distintas modalidades sensoriales (visual, auditiva y aptica principalmente), como en diferentes capacidades ya sea de rendimiento (en línea) o de resultados (a posteriori). Al igual que en los sistemas con dispositivos robóticos, los entornos virtuales facilitan el monitoreo del progreso del rendimiento de la persona conforme se administra la terapia.

A menudo las plataformas de rehabilitación basadas en realidad virtual tienen como objetivo el colocarlos en el hogar del paciente de manera que no sea necesario trasladarse a un centro especializado. Para implementar una plataforma de rehabilitación en el hogar, sin supervisión médica, aparte de requerimientos de seguridad y facilidad de uso; esta debe ser motivante para garantizar el apego además del cumplimiento con la terapia. Quizás por estas razones, no es infrecuente la

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

adaptación de sistemas originalmente lúdicos como es el caso de las videoconsolas Wii o PlayStation.

A continuación se mencionaran algunos entornos virtuales existentes:

Wii como herramienta para Rehabilitación.

Varios autores han explorado el uso de la plataforma *Wii* de *Nintendo* para rehabilitación [45, 17, 3]. El innovador control (*Wiimote*) de la *Wii*, contiene una serie de sensores así como botones, un cursor, un acelerómetro de 3 ejes el cual permite un seguimiento de los desplazamientos de las extremidades así como los de la muñeca [17]. Además la plataforma se completa con una cámara IR, dos actuadores, bocinas y un motor de vibración que entre todos proveen una excelente capacidad para dar retroalimentación tanto auditiva como háptica [17]. Aunque existen una serie de juegos lúdicos disponibles para esta plataforma que han sido utilizados por algunos autores [17], otros investigadores han optado por desarrollar su propio conjunto de juegos más apropiados para rehabilitación (Figura 2.6) [3]. En cualquier caso, la conclusión de las tareas depende en gran medida de las limitaciones del movimiento [49]. El sistema en principio es únicamente válido para la rehabilitación del brazo, ya que el mando no permite capturar el movimiento de los dedos de manera independiente [45]. Se ha sugerido que este sistema no puede ser utilizado por pacientes que tengan debilidad extrema.

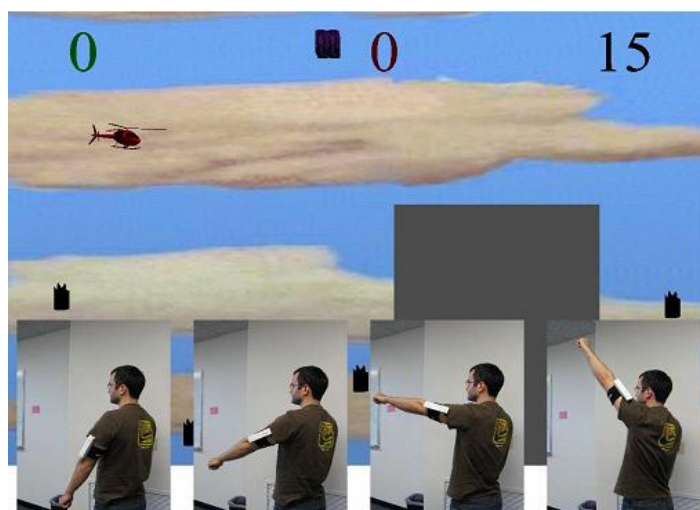


Figura 2.6 Ejemplo de un juego desarrollado para un sistema de rehabilitación que aprueba el Wii mote.

Deuschet al [17] obtuvieron resultados bastante interesantes como el alto interés despertado en completar las tareas alcanzando un excelente incremento en el apego especialmente cuando los pacientes tuvieron la oportunidad de interactuar con otros usuarios (opción multijugador).

El estudio de Alankus et al [3] tenía como principal objetivo encontrar criterios para el diseño de juegos que ayuden en la rehabilitación de los sujetos. Para ello, desarrollaron un pequeño conjun-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

to de juegos que pusieron a prueba y estudiaron la reacción de una pequeña cohorte (4 pacientes) a estos juegos. Entre los aspectos que encontraron de gran relevancia se encontraba la parte colaborativa de los juegos que ayuda en la motivación del sujeto para realizar las tareas, así como en la interacción social. También observaron la necesidad de la detección de compensación de movimiento. Esta resultó muy significativa al momento de realizar los desplazamientos utilizando la extremidad afectada para su recuperación. Finalmente este estudio determinó que una correcta calibración de los juegos es importante para la realización de las tareas y evitar el aburrimiento de los sujetos, en otras palabras, el nivel de dificultad y rango de movilidad son de gran relevancia. Los resultados de este estudio han contribuido en el desarrollo de la taxonomía que más adelante se detalla en este trabajo.

PlayStation.

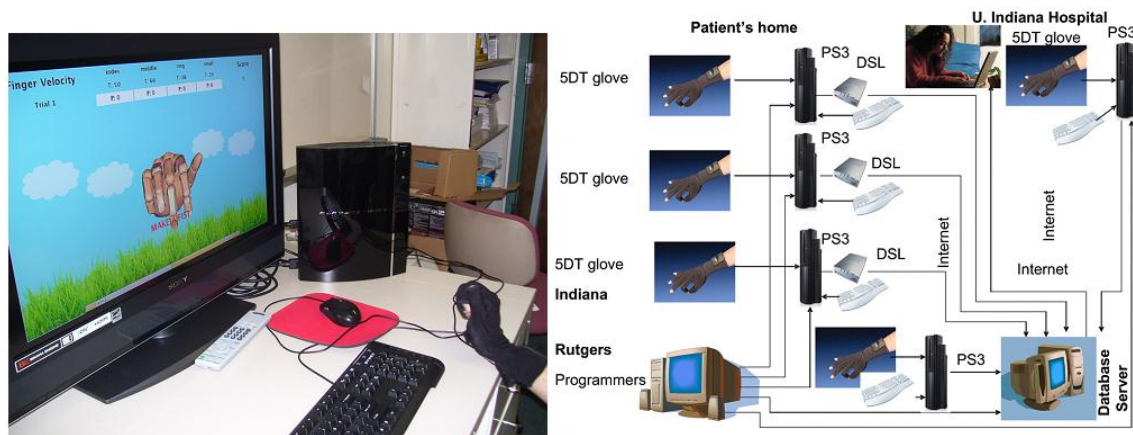


Figura 2.7 Izquierda: Se utiliza la PlayStation 3 para entrenar los dedos. Derecha: Se expone la arquitectura del sistema [35].

El *EyeToy* es una cámara que se puede añadir a la videoconsola *PlayStation* y que permite la captura de los movimientos del jugador en tiempo real. En los prototipos de plataformas para rehabilitación basados en la *PlayStation*, el uso de la videoconsola ha venido acompañado del *EyeToy*. En estos prototipos, los juegos que se han utilizado son los creados para este dispositivo por parte de la compañía (Sony). Flynn et al [66] estudiaron el caso de un paciente de infarto cerebral crónico. El paciente realizó 20 sesiones de 1h aproximadamente durante 4 semanas con los juegos de la *PlayStation* mientras sus movimientos eran recogidos por el *EyeToy*. Este estudio demostró la validez de usar *PlayStation/EyeToy* para rehabilitación con un incremento en la motricidad del paciente medido mediante la escala Fugl-Meyer que fue posiblemente consecuencia de la mejora del sentido propioceptivo. Además destacó la motivación con la que el paciente abrazó la terapia.

En otro estudio, Huber et al [35] modificaron el sistema *PlayStation 3* para adecuarlo a las necesidades de una plataforma de rehabilitación. Estas modificaciones incluyeron el cambio del sistema operativo a Linux, la inclusión de un puerto USB y la utilización de un guante para la captura de movimientos de la mano (Figura 2.7). Además este estudio desarrolló su propio paquete de jue-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

gos. El estudio piloto llevado a cabo por estos autores sugirió mejoras en la realización de actividades de la vida diaria (ADL) por parte de los pacientes.

En resumen, existe una evidencia inicial de que plataformas de entretenimiento tales como la *Nintendo Wii* y/o la *PlayStation* pueden reconvertirse en plataformas de rehabilitación. Su bajo costo al ser de producción masiva, y la motivación que generan son aspectos positivos de las mismas. No obstante, ya que no fueron inicialmente pensadas como plataformas de rehabilitación su uso por parte de pacientes con discapacidades motrices puede presentar inconvenientes; los juegos pueden no ser totalmente apropiados, o la plataforma podría servir únicamente para aquellos pacientes con discapacidades menos severas, entre otros. Para remediar estas limitaciones, se han desarrollado plataformas basadas en realidad virtual específicamente pensadas para rehabilitación.

Plataforma de Juegos Elinor.

Elinor es una plataforma de rehabilitación basada en realidad virtual que fue concebida principalmente para su uso en el hogar del paciente. Para cumplir con este fin, *Elinor* presume de una interfaz humano-computadora avanzada. La plataforma se controla con dos empuñaduras conectadas a un puerto USB, y aparte de estos dos controles, la plataforma únicamente incluye otro botón de encendido (Figura 2.8). Al arrancar, *Elinor* presenta el menú de juegos que es controlable directamente con las dos empuñaduras, por lo que el propio paciente puede controlar totalmente la plataforma sin ayuda de asistencia. Su conjunto de 15 juegos se desarrollaron en base algunos juegos clásicos y otros en conceptos de movimientos contemplados dentro de una terapia tradicional [74]. Los distintos juegos tienen asignado una proporción y horario lo que permite observar el rendimiento del sujeto, además de premiarlo cuando este activa un juego cada vez [74]. En este sentido, los juegos menos jugados aparecen más arriba en el menú.



Figura 2.8 El usuario interactúa con el sistema *Elinor* por medio de las manijas conectadas al sistema.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

En su estudio piloto, Taylor et al [74] buscaban evaluar el comportamiento de juego de los pacientes al usar la plataforma, incluyendo el monitoreo del tiempo de juego, el tipo de juegos seleccionados y de forma cualitativa los comentarios de los pacientes sobre su experiencia de juego. Seleccionaron cinco sujetos con hemiparálisis consecuencia de un problema cerebro vascular. La edad promedio de esta pequeña cohorte estuvo arriba de los 50 años. Algunos de ellos tenían experiencia con ordenadores así como con juegos de computadora. Se les instaló el sistema en sus hogares para que sus familiares y amigos también probaran el sistema. El experimento tuvo una duración de 5 semanas, que incluían una visita por semana por parte de los terapeutas. En cada visita del terapeuta se realizaba una entrevista al paciente para determinar posibles dificultades en la interacción con el sistema, además de evaluar otros comentarios (si los juegos fueron divertidos, si el concepto de rehabilitación es de utilidad, etc.). Ya finalizada las cinco semanas de tratamiento, de nuevo se realizó una entrevista con cada uno de ellos. Los resultados mostraron una inversión de tiempo en la terapia por parte de los pacientes era mayor de lo esperado lo que puede interpretarse en términos de una mayor motivación. Además, incluso aquellos sin experiencia previa en juegos de computadora pudieron disfrutar de los juegos gracias a la sencilla interfaz.

Sistema de rehabilitación de la Universidad de Ulster.

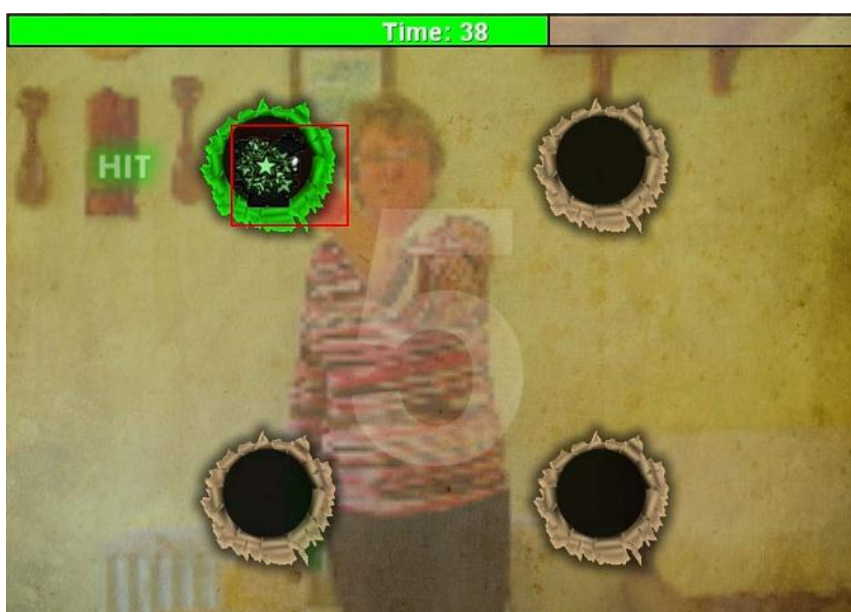


Figura 2.9 *Rabbit Chase*; este juego consiste en indicar hacia cual agujero va llegar el conejo.

El sistema desarrollado entre las universidades de Derby y la del Ulster es un entorno virtual enfocado a pacientes sobrevivientes a un ataque cerebro vascular con motricidad deficiente en las extremidades superiores. Este sistema utiliza sensores magnéticos para el seguimiento de movimientos. La presentación del entorno virtual se hace a través de una pantalla montable sobre la

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

cabeza (*Head mounted display*). La plataforma se completa con un conjunto de juegos desarrollados ex profeso y que permiten diferentes tipos de ejercicios. Así por ejemplo el juego *Rabbit Chase* está pensado para la rehabilitación de un solo brazo (Figura 2.9), el *Arrow Attack* para una rehabilitación bimanual y por ejemplo el *Bubble Trouble* permite ambas modalidades [8]. El control puede ser vía un guante, una cámara web que captura el movimiento o el mando de la *Wii*, y viene determinado por cada juego en particular. Burke et al [8] realizó un ensayo en dos etapas para probar la validez de esta plataforma. En la primera etapa se evaluó la usabilidad de los juegos. 10 sujetos sanos jugaron 2 de los juegos; *Arrow Attack* y *Bubble Trouble*. Posteriormente, se les proporcionó un cuestionario (empleando una escala tipo Likert) para evaluar los juegos. Estos indicaron en los resultados que la adaptabilidad del nivel de dificultad en los juegos fue una pieza clave para ayudar a mantener el interés. Además, la retroalimentación fue percibida como efectiva a pesar de pequeños defectos como la no presentación de la puntuación. Finalmente, tanto el guante como la cámara web y el mando de la *Wii* fueron calificados como intuitivos.

En la segunda etapa se reclutaron pacientes de infarto cerebral con una discapacidad menor. De la misma forma que en la anterior etapa, la retroalimentación resultó de gran importancia debido a que los pacientes podían percibir tanto sus errores y como sus aciertos favoreciendo una correcta restauración de la movilidad. Los juegos más empleados fueron *Rabbit Chase* y *Bubble Trouble*. El menos empleado de todos fue *Arrow Attack* que demanda un mayor esfuerzo para completar la tarea. Los autores concluyen que los juegos desarrollados tienen una buena usabilidad y jugabilidad [8].

Plataforma de Ejercicios Virtual Controlada por Ratón.

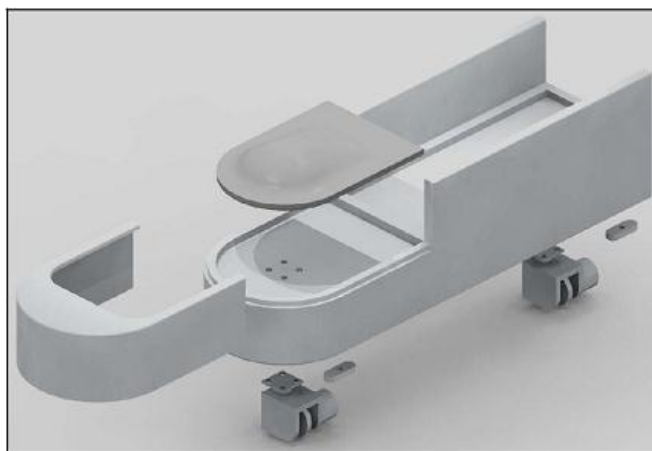


Figura 2.10 Plataforma de ejercicios virtual controlada por ratón. Cuenta con una almohadilla para confort del paciente, y una serie de ruedas para su desplazamiento.

Este sistema está diseñado para pacientes que tienen una lesión en el cordón o médula espinal. Para esto se identificaron las siguientes necesidades [16]: (i) El soporte para la extremidad debe ser confortable, (ii) el dispositivo debería de ofrecer distintas variables de resistencia como la eli-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

minación de la gravedad del ambiente haciéndolo capaz de desplazarse sobre su peso basándose en la fisioterapia y (iii) guardar los datos de los movimientos para la retroalimentación del terapeuta. Además la plataforma cuenta con unas características adicionales como ser de bajo costo, adaptables para su implementación en el hogar del paciente y juegos o programas que ayuden en la estimulación [16]. La plataforma consiste en una tablilla deslizable controlada por el sujeto que sirve además como soporte. La tablilla actúa como si fuese un ratón que permite el control de los juegos [16]. La tablilla incorpora unas ruedas que aportan un nivel de fricción controlable (Figura 2.10). Para ayudar en el fortalecimiento de la extremidad, se modela la fricción de las ruedas con la superficie.

Terapia por Gestos.



Figura 2.11 El paciente se coloca enfrente del equipo donde se encuentra la cámara web y este interactúa con los juegos por medio del grip-er conectado al equipo.

Terapia por Gestos [68, 70, 71] es la plataforma central sobre la que trabaja esta tesis. Fue desarrollada en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en colaboración con el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía (INNN), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de California en Irvine (UC-I). Entre sus objetivos está el desarrollo de un sistema de rehabilitación que pueda ser utilizado en el hogar y que por su bajo costo sea accesible en países de ingreso medio o bajo, como es el caso de México. Cómo en otras plataformas de rehabilitación basadas en realidad virtual, los ejercicios de rehabilitación se practican mientras el paciente juega a sencillos juegos que representan tareas ordinarias. Lo que distingue a *Gesture Therapy* de sus contrapartes es que hace un uso intensivo de modelos de toma de decisión.

El sistema captura los movimientos de la extremidad mediante un sistema de visión, que en su primer prototipo contaba con un sistema estereoscópico, y posteriormente en versiones más re-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

cientes fue sustituido con un sistema monoscópico de menor coste, pero sin perder la capacidad de estimar la profundidad de la extremidad. El sistema de seguimiento 3D monocular ha sido construido sobre un filtro de partículas (Figura 2.12).

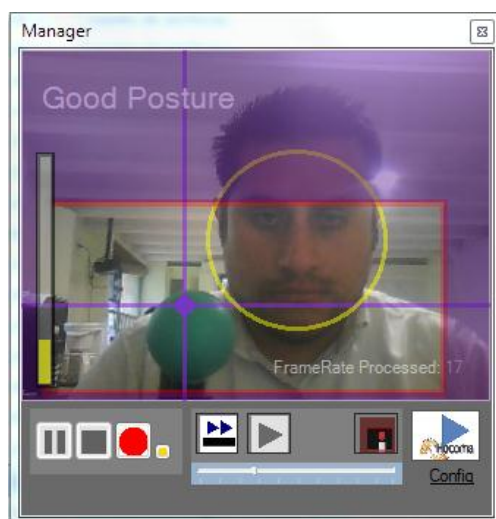


Figura 2.12 Interfaz del sistema de rastreo de partícula. El terapeuta configura previamente el sistema de seguimiento, como el color a seguir, el área de desplazamiento, etc.

Entre otras innovaciones *Gesture Therapy* ha contribuido con dos nuevos controladores para los juegos; un *gripper* o manija para la rehabilitación del brazo y que además incorpora un sensor de presión para reentrenamiento de los movimientos de flexión de los dedos, y un controlador para el entrenamiento de los dedos que permite el reentrenamiento de los dedos, tanto para flexión como para extensión (Figura 2.11). Su modelo de adaptación a las necesidades del paciente está basado en procesos de decisión de Markov parcialmente observables (POMDP por sus siglas en inglés). Hasta la presentación de este trabajo, *Gesture Therapy* no contaba con un paquete de juegos propios. *Gesture Therapy* hasta ahora ha funcionado reaprovechando el paquete de juegos de la plataforma *Armeo* de *Hocoma*. Para su validación clínica se han llevado a cabo dos ensayos clínicos [70, 56, 72] que han mostrado un incremento de la destreza motriz de los pacientes comparable a la de una terapia ocupacional tradicional (Fugl-Meyer e Índice de Motricidad), pero con un pequeño incremento de la motivación (Escala de Motivación Intrínseca).

La plataforma *Gesture Therapy* es aún una plataforma en desarrollo y aún presenta algunas limitaciones. En términos de su sistema de visión, una desventaja que muestra el sistema, es la confusión del color de la mano con otro objeto de coloración semejante a la piel humana [69]. Así mismo, los cambios en la iluminación pueden afectar a la precisión del sistema de visión. Actualmente se trabaja en mejorar el modelo de adaptación con técnicas de transferencia de conocimiento, y en mejorar el sistema de juegos, de la que esta tesis es el primer paso.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

2.3.6. Otras alternativas de rehabilitación.

De la discusión anterior se puede concluir que actualmente existen diferentes alternativas para la administración de terapias de rehabilitación motora a pacientes de infarto cerebral. Existen distintos paradigmas cada uno de ellos con distintas ventajas e inconvenientes, y para cada paradigma, distintas realizaciones del mismo. El panorama de opciones anteriormente presentado no es exhaustivo. A continuación se mencionan otras alternativas en cuestión de rehabilitación motriz [27]:

- *Recuperación motora por medicación.* Bajo este paradigma se utilizan sustancias que estimulen al sistema motriz. La evidencia con modelos animales con lesiones cerebrales provocadas a los que se les ha administrado anfetaminas sugiere que estas aceleran su recuperación. Los ensayos clínicos iniciales en humanos confirman esta tendencia. Además de las anfetaminas, otros fármacos que se han proporcionado son estimulantes como metilfenidatos y anti-depresivos para la captación de serotonina.
- *Utilización de Bio-retroalimentación.* La bio-retroalimentación es el proceso por el cual un paciente se hace consciente de las funciones fisiológicas mediante el uso de instrumentos que provean de información sobre ese proceso fisiológico, con la finalidad de que el paciente pueda manipular el proceso fisiológico a voluntad. En rehabilitación, la bio-retroalimentación se ha utilizado para conseguir la contracción de músculos espásticos que intervienen en el movimiento para mejorar el equilibrio y la coordinación en ellos (agonista y antagonista). Para ello se utiliza un sistema electrónico que reconoce las reacciones fisiológicas y las transforma en señales ya sean acústicas o visuales. Para su uso se requiere que el individuo sea capaz de entender el objetivo de las actividades y las instrucciones que se le proporcionan. El paciente debe tener tanto una motivación como una participación activa en las tareas y ser capaz de realizar movimientos exploratorios como alcanzar un objeto.
- *Estimulación eléctrica funcional.* La estimulación magnética transcraneal, permite inducir pequeñas corrientes eléctricas que activan ciertos grupos de neuronas de forma no invasiva. Al aplicar una corriente eléctrica en las neuronas motoras se produce una contracción muscular y su objetivo es el fortalecimiento de los músculos, la inhibición del músculo antagonista, la corrección de contracturas, la prevención de la luxación de hombro y la facilitación del control voluntario. Para la aplicación de este tipo de tratamientos se requiere que el paciente tenga un adecuado nivel cognitivo y muestre una participación activa como en el caso anterior. Un inconveniente es el diseño de un dispositivo que esté enfocado a las extremidades superiores, y el costo del dispositivo, así como la dificultad de su aplicación.
- *Estimulación neuro-muscular activada electromiográficamente.* La electromiografía es una técnica para evaluar y monitorear la actividad eléctrica producida en los músculos. La rehabilitación bajo este paradigma consiste en iniciar un movimiento de forma voluntaria y a partir de un umbral prefijado se activa un estimulador eléctrico. Esto permite un en-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

trenamiento en específico, individualizado y repetitivo, sin la necesidad de supervisión directa.

2.3.7. Análisis de tratamientos.

A pesar de todas estas alternativas, la ciencia de la rehabilitación está aún en su infancia. Aunque se conocen algunas de las estrategias de reorganización funcional más comunes, existe aún un desconocimiento profundo de los cambios neurológicos que conllevan a una buena rehabilitación. Es más, incluso a nivel del comportamiento observable, léase la mejora de la destreza motriz, ninguna de las técnicas ha demostrado una clara superioridad sobre las demás en términos estadísticos [43]. De alguna forma, los ensayos clínicos sobre rehabilitación llevados a cabo hasta ahora siguen padeciendo de limitaciones en la variedad de movimientos ensayados, el tamaño de las cohortes, la homogeneidad de las mismas, o la tolerancia de los pacientes a terapias prolongadas.

En resumen, la rehabilitación de un infarto cerebral se basa actualmente en la evidencia de la neuro-plasticidad responsable de la recuperación [18, 39]. El campo de la neuro-rehabilitación es aún un campo donde queda mucha investigación por hacer y hay aún muchos interrogantes abiertos. Las terapias basadas en realidad virtual son sólo la última pieza en añadirse al puzzle y como tal aún debe consolidarse como una alternativa válida a terapias más clásicas. No obstante, la evidencia preliminar es alentadora y los posibles beneficios justifican la inversión de tiempo y dinero en mejorar los sistemas actuales.

2.4. CONCLUSIÓN.

Tras una breve presentación de las causas y consecuencias de un infarto cerebral, este capítulo ha repasado las principales alternativas que existen actualmente para la administración de una terapia de rehabilitación motriz subsecuente a un infarto cerebral. La mayoría de los métodos y técnicas tratan de beneficiarse de la plasticidad cerebral para favorecer una reorganización funcional beneficiosa. La escuela principal que ha estado manteniéndose en la actualidad es Bobath. No en vano, algunos de los tratamientos actuales están basados en sus principios. Uno de estos es la terapia de movimiento inducida por la restricción del miembro sano. Sin embargo, nuevos enfoques como la utilización de medicamentos para ya sea para la estimulación muscular como para combatir la depresión del sujeto arrojan resultados prometedores. La exploración de nuevas tecnologías como las ciencias computacionales, electrónica y la robótica que ofrecen el desarrollo de distintos dispositivos también pueden ayudar a mejorar la destreza motriz del paciente al tiempo que por su naturaleza proveen de un entorno único en el que monitorear el progreso del sujeto en el tratamiento.

Para el siguiente capítulo, revisaremos algunos criterios empleados en trabajos anteriores a este para el diseño de ambientes virtuales basados en juegos y son empleados en rehabilitación. Siendo estos un punto de partida para la creación de nuestra taxonomía. Además se da a conocer las distintas escalas empleadas en la evaluación de nuestros juegos.

Capítulo 3 . Taxonomía de criterios de di- seño para el desarrollo de juegos de reha- bilitación.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

3.1. INTRODUCCIÓN.

Este capítulo presenta una taxonomía de criterios de diseño de juegos de computadora para su uso en terapias de rehabilitación motora. Los criterios de diseño de juegos son aquellos aspectos fundamentales que deben regir la concepción, el planteamiento, la implementación y la ejecución de los juegos en el entorno para el que fueron pensados. Estos criterios son más una condición necesaria que suficiente; acatarlos es una condición *sine qua non* para que el juego cumpla con el propósito para el que fue diseñado.

En el diseño de plataformas de juegos, ya sea dedicados al entretenimiento o juegos serios¹ debemos de tomar en cuenta ciertas particularidades que deben contener para que los juegos puedan alcanzar su propósito además de ser atractivo para la población objetivo. El sistema de juegos que pretendemos diseñar no es una excepción. En nuestro caso, la población objetivo son sujetos adultos sobrevivientes de un evento cerebro-vascular. El capítulo abre describiendo brevemente los principales pilares de la rehabilitación; pilares que deben ser incorporados en los juegos para rehabilitación. A continuación, el capítulo repasa la literatura existente sobre criterios de desarrollo de juegos, y propone una taxonomía de estos criterios para que cumplan con los pilares de la rehabilitación. Finalmente el capítulo cierra con el desarrollo de un cuestionario para evaluar como los juegos cumplen o no con estos criterios.

3.2. LOS PILARES DE LA REHABILITACIÓN

Cinco son los pilares de la rehabilitación que determinan la restauración de la motricidad [72]:

- **Repetición:** La repetición de movimientos es importante para el reentrenamiento motor así como para los cambios corticales que suscita [51]. La rehabilitación del movimiento puede demandar cientos de repeticiones antes de que el progreso sea observable [29]. La evidencia sugiere que mientras más se practique, mejor es la rehabilitación [41], aunque desafortunadamente, el número de repeticiones que ocurren durante una terapia clásica es a menudo insuficiente [10].
- **Retroalimentación:** La retroalimentación mejora el aprendizaje y es crítica para el reentrenamiento motor [51]. La retroalimentación suscita procesos neurofisiológicos que inducen cambios profundos a nivel cortical y subcortical [17]. La retroalimentación viene en dos formas principales; de rendimiento y de resultado. La primera se refiere a la retroalimentación en tiempo real relativa a la cinemática del movimiento. La segunda provee información a posteriori sobre éxito o fracaso del movimiento.
- **Motivación:** La motivación del paciente es fundamental para garantizar el apego al tratamiento [14, 32]. La sencillez de la tarea, su brevedad, la creencia de que la mejora en la salud depende de uno mismo, unas instrucciones claras y entender los beneficios de la terapia son factores que afectan a la motivación [14]. Las gratificaciones e incentivos pueden

¹ Los juegos serios son aquellos que no tienen un fin lúdico sino que están encaminados hacia fines militares (adiestramiento), educativos (aprendizaje tanto en niños como en adultos), médicos (rehabilitación), etc.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

artificialmente mejorar la motivación [8]. Finalmente, el elemento social de involucrar a familia y amigos también ejerce un peso beneficioso para la motivación [3].

- Intervención temprana: Aunque la evidencia sugiere que mientras antes se comience con el programa de rehabilitación, mayor es el aprovechamiento de la plasticidad natural del cerebro [65], la comunidad científica aún no se pone de acuerdo en que tan temprano es temprano. La rehabilitación temprana puede comenzar entre 3 y 30 días posteriores al infarto, pero el momento óptimo sigue siendo controversial [64].
- Entrenamiento orientado a tareas: La repetición de un movimiento por sí sola es insuficiente para promover la reorganización funcional del córtex. La repetición del movimiento debe ir aunada al éxito incremental en alguna tarea con un objetivo claro [51]. Aunque no existe una definición definitiva de que significa el entrenamiento orientado a la tarea, a menudo esta se refiere a un rango de intervenciones incluyendo ejercicios en una caminadora, ejercicios de sentarse y ponerse de pie, ejercicios de agarrar objetos y ejercicios de alcance [60].

3.3. CRITERIOS DE DESARROLLO DE JUEGOS PARA REHABILITACIÓN PROPUESTOS EN TRABAJOS ANTERIORES A ESTE.

Aunque existe literatura relacionada con el desarrollo de juegos para rehabilitación que a menudo incluye la mención de elementos y criterios necesarios para dicho desarrollo [8, 19], estos esfuerzos son a menudo descoordinados sin que exista una línea de investigación clara para establecer una enumeración y clasificación exhaustiva de los mismos. Esta sección repasa algunos de estos esfuerzos que serán la semilla de la taxonomía que se propone más adelante en este mismo capítulo.

Criterios para la rehabilitación de personas que han sufrido infartos cerebrovasculares.	Criterios para el entretenimiento de personas mayores.
<ul style="list-style-type: none">• Adaptabilidad de acuerdo a las habilidades motoras del paciente.• Tareas significativas para el paciente.• Ayuda y comentarios apropiados.• Terapia de acuerdo al rango de movimiento del paciente.• Atención desviada al ejercicio.	<ul style="list-style-type: none">• Reto cognoscitivo apropiado.• Interfaz simple y objetivo claro.• Inclusión de comentarios motivacionales.• Elementos de actividad social.• Apropriados al género.• Facilitar el nuevo aprendizaje siguiendo las instrucciones de los expertos.• Sensibilidad con la pérdida de la agudeza sensorial y respuestas lentas del paciente.

Tabla 3.1 Criterios que deben cumplir juegos de computadora para que sean apropiados para su uso en rehabilitación acorde a Flores et al [19].

La Tabla 3.1 resume los criterios citados por Flores et al [19]. Estos autores exploran los criterios que deben cumplir los juegos de computadoras para que sean apropiados para su uso en rehabilitación, no desde la perspectiva del desarrollo propio, sino desde la adaptación de algunos juegos comerciales populares [19]. En esta enumeración, los criterios se agrupan bajo dos necesidades; la

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

necesidad de la terapia de rehabilitación per se, y la necesidad de entretener a un colectivo de pacientes que a menudo no está familiarizado con los juegos de computadora.

Dentro de este conjunto de criterios para juegos para rehabilitación, una característica importante es la adaptabilidad motora. Esta podría ser planteada como ajustes en el nivel de dificultad del juego de acuerdo a la evolución de las habilidades del sujeto con su extremidad afectada conforme se administra el tratamiento. Por otro lado, las actividades representadas por los juegos deben contener un significado para quien se está rehabilitando para lograr captar su interés en ellos [19, 69]; en otras palabras, el entrenamiento debe estar orientado a tareas con un objetivo claro y que tenga una traslación clara a la vida diaria del paciente. En este sentido, la significancia de las tareas se puede conseguir haciendo que el juego se fundamente en una actividad cotidiana.

La retroalimentación sirve para indicar al paciente y al terapeuta si el primero está realizando bien los movimientos, y se apoya en la interacción con el sistema [19]. Así mismo, la actividad implementada en el juego debe ser apropiada al rango de movilidad de cada paciente. Para ello los juegos pueden incorporar elementos de calibración a priori, elementos de adaptación en tiempo real o una mezcla de ambos. Cada sujeto tiene distintas necesidades motoras, y debemos de apoyarnos en el programa de rehabilitación marcado por el terapeuta [19].

De la tabulación de criterios en la Tabla 3.1 aprendemos que los juegos de rehabilitación no sólo deben incorporar elementos que optimicen su uso y aprovechamiento teniendo en cuenta las limitaciones motrices del paciente, sino que además debe de tener en cuenta la población objetivo, ya sean los adultos mayores en el caso anterior, o quizás otros colectivos diferenciados por edad, genero, raza o cultura. Por ejemplo, enfocándonos hacia el entretenimiento de sujetos mayores, los juegos no deben ser demasiado complejos, de manera que sean fáciles de comprender ya que esta población en general no tiene destreza en el uso de las computadoras [8]. Igualmente deben presentar un reto apropiado para ayudar a conseguir una mayor atención hacia el juego sin caer en la monotonía de manera que se transforme en algo aburrido. Por último, incluir criterios de accesibilidad hacia la pérdida de visión y audición de los sujetos, sea por cuestión de edad o por efectos de la lesión cerebro-vascular. En niños, Harris et al [32] han identificado elementos de juegos de computadora que pueden aumentar la motivación en niños incluyendo lo impredecible del entorno, el reto ligeramente superior a las capacidades del niño, o los elementos competitivos.

3.4. CRITERIOS DE DESARROLLO PARA AMBIENTES VIRTUALES PROPUESTOS EN ESTA TAXONOMÍA.

3.4.1. Edad

La edad del paciente determina el tipo de juegos a presentar y afecta tanto al contenido como a la interfaz del mismo. Las tareas que son significativas para un adulto mayor, no necesariamente lo son para un niño o un adolescente, y viceversa. La gente adulta en su mayoría no está familiarizado con la tecnología, por lo tanto, les cuesta un poco de trabajo considerarla dentro en su vida cotidiana. Por otra parte, la edad puede afectar la pérdida de algunas capacidades como la auditi-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

va, visual, entre otras. En el lado opuesto del espectro, un niño puede no tener destreza lectora, por lo que no puede haber textos excesivamente largos, y quizás las opciones deben de venir representadas por iconos. Estas diferencias entre las edades dictan los requerimientos de la interfaz. El ritmo de juego debe ser repetitivo en el caso de niños, más acelerado en caso los adolescentes, y más pausado en el caso de los mayores. En resumen, la edad del sujeto debe guiar el diseño de la interfaz e incluso determinar la significancia de las tareas.

3.4.2. Destreza Motora.

Ya en el capítulo anterior hemos visto como un accidente cerebro-vascular puede afectar a un individuo de distintas formas. Las consecuencias de un infarto cerebral sobre el sistema motor pueden tener distintas variaciones afectado de forma distinta a distintas partes del cuerpo y grados de severidad. En general las necesidades no son la misma para todos, no en vano, diferentes plataformas de rehabilitación tienen objetivos distintos. Por ejemplo, algunas están pensadas para el brazo, otras para la recuperación de la movilidad en las extremidades inferiores, y otras están diseñadas para favorecer la recuperación de la mano. En este sentido, e independientemente de la extremidad a la que esté orientada la plataforma, la adaptabilidad de los juegos debe ser conforme a la movilidad de los miembros afectados observando que tanto se puede extender y flexionar la parte afectada, haciendo que el sistema no supere en exceso sus capacidades, evitando la frustración al realizar las actividades para después abandonar el tratamiento.

Aunque el ritmo de la terapia viene marcado por el plan del terapeuta, los juegos deben admitir un rango de adaptabilidad que les permita ser útil en etapas tempranas, intermedias y tardías de la recuperación. Esta habilidad puede ajustar el reto del juego incrementado o disminuyendo la dificultad del mismo. Además, la significancia de la tarea también se puede ver afectada por la limitación de la movilidad. En limitaciones más severas, las tareas deben ser necesariamente más fundamentales. Por ejemplo, en etapas más tempranas las tareas representadas en los juegos enfocados a la rehabilitación de los dedos deben enfatizar los movimientos de flexión y extensión de los mismos. A medida que avanza la terapia, las tareas representadas en los juegos deben enfocarse al fraccionamiento (capacidad de mover los dedos individualmente) [65].

Tras un evento cerebral las extremidades pueden quedar rígidas o muy débiles para realizar algún desplazamiento. Si la debilidad del paciente es severa, este será incapaz de sostener su extremidad afectada. En este sentido, diferentes plataformas de rehabilitación deben incorporar soluciones que se ajusten a las necesidades de diferentes grupos de pacientes. Por ejemplo, consciente de que los pacientes con discapacidades más severas no podrían agarrar la manija controladora, los creadores de *Gesture Therapy* han desarrollado un arnés de soporte para que aquellas personas demasiado débiles, puedan agarrar la manija. Otras plataformas para la rehabilitación del brazo como *Java Therapy* proveen de un soporte para el brazo.

Así mismo, si el paciente presenta rigidez en la extremidad afectada, esta puede limitar su desempeño. Acompañando la rigidez, pueden producirse molestias físicas (dolor) al realizar las tareas. En este sentido, los sistemas de rehabilitación robóticos no sólo estimulan la flexión y extensión del

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

brazo, sino que además proveen de soporte para la extremidad afectada y pueden asistir al movimiento en la modalidad conocida como activa asistida [34]. En la modalidad activa asistida, el paciente inicia el movimiento y la plataforma le ayuda a completarlo. Aunque un entorno virtual no puede proveer de soporte físico para la modalidad activa asistida, si puede incorporar elementos que simulen dicha asistencia, por ejemplo, incorporando inercia o controlando la fricción virtual.

3.4.3. Depresión Post-Ictus.

La depresión en la que con frecuencia se cae tras un episodio cerebrovascular tiene un gran impacto en la vida del paciente y esto se ve reflejado en su desempeño durante la terapia [44]. A menudo, después de un accidente cerebro vascular, los pacientes de edad avanzada se sienten inútiles y pierden la voluntad por rehabilitarse. Dos elementos son clave para entender la depresión post-infarto [54, 36]. El nivel de fatiga, que hace referencia a la aparición del cansancio y a la vitalidad del paciente, y el nivel de depresión entendido como el estado de ánimo del paciente. La fatiga y la depresión van de la mano. Un paciente que presenta síntomas depresivos demasiado fuertes, difícilmente contará con la suficiente energía para llevar a cabo las actividades indicadas por la terapia.

- **Nivel de Fatiga.** Hoy día las plataformas de rehabilitación basadas en entornos virtuales empiezan a monitorear el estado de fatiga del paciente en tiempo real a partir de medidas derivadas como la precisión o la velocidad en realizar las tareas, y actúan en consecuencia [33, 6].
- **Nivel de depresión.** Varios autores concluyen que niveles de depresión severos puede representar una complicación para la recuperación [79]. La rehabilitación psicológica del paciente a menudo transcurre de forma paralela a su rehabilitación física. Actualmente, las plataformas de rehabilitación basadas en realidad virtual aún carecen de la capacidad de estimar el nivel de depresión de un paciente en tiempo real.

3.4.4. Estilo de vida.

El estilo de vida del paciente es relevante para el terapeuta. Engañosamente podría pensarse que el estilo de vida del paciente es irrelevante en el desarrollo de juegos de rehabilitación. No obstante, la significancia de las tareas puede depender de dicho estilo de vida. La prioridad que cada paciente otorgue a cada tarea puede hacer que disfrute o no de la representación de ciertas tareas en los juegos. Por ejemplo, alguien con un estilo de vida más sedentario podría no disfrutar de aquellos juegos que sugieran tareas deportivas o actividades al aire libre. Alguien más habituado al trabajo doméstico podrá aceptar con mayor facilidad la simulación tareas tales como cocinar o limpiar cristales. En cualquier caso, a menudo el mismo movimiento de rehabilitación puede camuflarse como diferentes tareas en los entornos virtuales.

3.4.5. Grupos de apoyo.

Una ayuda importante en rehabilitación, es el apoyo familiar y social del sujeto; de forma que personas allegadas se involucren en cierta medida en su recuperación. Para favorecer el apoyo de personas cercanas al paciente en su recuperación las plataformas de realidad virtual pueden in-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

corporar juegos con modo colaborativo donde el paciente y un tercero involucrado en su recuperación deben aunar esfuerzos y coordinarse para conseguir lograr algún objetivo. Así mismo, los juegos pueden tener una modalidad de competición donde el paciente se enfrenta con otros sujetos. En esta modalidad, los juegos deben de proveer un entorno donde se nivelen las habilidades del paciente y el sujeto sano de forma que ambos posean las mismas capacidades para que el paciente no se sienta en desventaja. Esto no es trivial debido al hándicap de cada sujeto.

3.4.6. Estado de comorbilidad.

La comorbilidad se refiere a la existencia de trastornos adicionales a una enfermedad primaria. Ocasionalmente el paciente puede no sólo presentar complicaciones por consecuencia del problema vascular cerebral per se, sino que también puede presentar otras complicaciones adicionales. Estas complicaciones secundarias pueden afectar a su rehabilitación. Por ejemplo aquellos pacientes que sufran de artritis reumática previa al accidente podrían verse limitados para llevar a cabo ciertas tareas o utilizar determinados dispositivos. Pacientes con diabetes que ya hayan podido perder agudeza visual podrían requerir que la retroalimentación fuese encauzada a otras modalidades sensoriales. Pacientes con problemas cardiovasculares podrían necesitar de una reducción del modo de competición de los juegos. En general, se debe analizar si las complicaciones adyacentes al accidente cerebrovascular impiden que el sujeto pueda realizar las actividades contenidas en los juegos o que tareas puede realizar sin limitación alguna.

3.4.7. Ventana de oportunidad

Ya en la sección 2.3. TERAPIAS., se discutió la relevancia de la ventana de oportunidad, y al principio de este capítulo se manifestó el beneficio de una intervención temprana. En este sentido, la evidencia sugiere que es recomendable comenzar lo más temprano posible una vez que el sujeto tenga una condición estable con el objetivo de dirigir la plasticidad cerebral [8]. Es necesario observar la naturalidad de la recuperación del sujeto realizando las actividades impuestas y verificar si hay alguna molestia física al efectuar las tareas [27]. No tenemos constancia de estudios que hayan investigado como la realidad virtual, a través de los juegos serios, puede acelerar la administración de la terapia. No obstante no es impensable que la realidad virtual a través de un entorno que replique la tarea funcional pudiera ejercer un beneficio similar a la del ensayo mental que en la literatura en inglés agrupa a varios términos relacionados; *mental rehearsal*, *mental practice* y *motor imagery*, y que es de por sí una técnica de rehabilitación exitosa [43]. Esta visualización virtual de la tarea no requiere de una destreza motriz mínima y por tanto puede ser utilizada desde el primer momento de la recuperación.

3.4.8. Adaptación al paciente.

En la adaptación de una terapia no sólo intervienen aspectos de configuración, si no además existen aspectos más complejos como necesidades y metas personales, culturales, carácter distintivo del servicio, restricciones del terapeuta, entre otros [31]. Por estas razones es primordial diseñar correctamente el programa de rehabilitación para mejorar el rendimiento de la persona; por esta razón algunos autores recomiendan por ejemplo modificar el escenario en caso de ser necesario para llevar a cabo las actividades de la terapia (colocar bien la silla donde se situará a la persona,

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

suspender parcialmente el peso de la extremidad afectada); otra es acondicionar los factores que impliquen a la persona en la involucración activamente dentro de la terapia (instrumentos o dispositivos, instrucciones del terapeuta, etc.) [27].

3.4.9. Dosis

La necesidad de regular la intensidad y duración de la terapia ya se ha discutido en la sección 2.3. TERAPIAS. la dosis terapéutica tiene a su vez varias facetas que los juegos para rehabilitación deben modelar:

- **Agentes Activos.** El agente activo es el componente fundamental que auxilia en la terapia como: la adaptación del entorno en la terapia ocupacional, el ejercicio en la terapia física o la sustancia química en la administración de fármacos. Por razones obvias, el agente activo debe formar parte de los juegos, pero su administración y presentación puede ser modulada. Por ejemplo en una terapia ocupacional, se debe considerar de qué manera se adaptarían las actividades contempladas, si deben incluirse o no distractores, si debe abstraerse la tarea o ser más realista y enfocada.
- **Intensidad, frecuencia y repetición.** La frecuencia e intensidad de los movimientos deben ser acorde a las especificaciones del terapeuta. Ya se ha indicado que la efectiva rehabilitación de un movimiento puede requerir cientos de repeticiones antes de que el progreso sea observable [29]. Los juegos para rehabilitación deben incorporar la capacidad de regular la intensidad y la frecuencia de los movimientos, ya sea de forma explícita retroalimentando parámetros tales como el número de movimientos por unidad de tiempo, o bien de forma implícita aumentando y/o disminuyendo la intensidad y frecuencia mediante el control del nivel de reto. Además, las actividades propuestas por los juegos no deben producir un desgaste físico innecesario poniendo en riesgo la integridad del individuo.
- **Nivel de capacidad (carga de trabajo).** Si el nivel exigido supera la carga de trabajo asumible por el paciente, este tiende a frustrarse y en consecuencia puede conllevar el abandono del tratamiento. Para evitar esto, los juegos de rehabilitación deben adecuar la carga física y cognitiva en las actividades. En este sentido, el nivel debe de incrementarse conforme va evolucionando en su tratamiento [8]. El factor clave que deben incorporar los juegos es la adaptabilidad. Sin esta, la inmovilidad de los juegos impacta en su eficacia a la hora de favorecer la recuperación.
- **Duración.** La duración de la terapia tiene tres niveles. A nivel global, la terapia se desarrolla a lo largo de varias semanas o meses. A nivel sesión, una terapia de rehabilitación se administra en sesiones con el terapeuta con una determinada duración del orden de horas. Finalmente a nivel de actividad, durante una sesión la terapia se administra en forma de varias tareas cada una con una duración de algunos minutos. Es frecuente que las plataformas de rehabilitación basadas en realidad virtual incorporen alguna forma de *user profiling*, en la que se registren estadísticas sobre la actividad de uso. Esta forma de monitoreo de la actividad sólo contempla controlar la duración de forma pasiva. Es posible además controlar la duración de forma activa limitando el tiempo de los juegos por ejem-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

plo a sesiones de 3 minutos, o favoreciendo el orden en que se juegan. Por ejemplo, la plataforma Elinor favorece que los juegos menos usados aparezcan más arriba en la lista de los juegos (la selección de los juegos más utilizados requiere de un mayor esfuerzo).

3.4.10. Retroalimentación adecuada.

En una terapia tradicional la retroalimentación tiene una importancia crítica ya que influye en la forma en que el paciente realiza las tareas. En las sesiones, las instrucciones por parte del terapeuta hacia el sujeto deben ser claras y precisas para poder ejecutar correctamente los desplazamientos evitando patrones de movimiento inadecuados. Las plataformas de realidad virtual ofrecen unas capacidades enormes a la hora de proveer de retroalimentación tanto al paciente como al terapeuta. La retroalimentación puede abarcar distintos canales sensoriales; visuales, auditivo o háptico principalmente. Se puede ofrecer en tiempo real (de rendimiento) o a posteriori (de resultado). Puede incorporar información generada artificialmente más allá de la presente en el entorno, lo que se conoce como retroalimentación aumentada [75]. Actualmente todos los juegos para rehabilitación incorporan alguna forma de retroalimentación. La retroalimentación en entornos virtuales se puede ofrecer bajo varias presentaciones: profesor virtual, aprendizaje por imitación, recompensas, aumentada, aprendizaje libre de errores, etc. A menudo se ha sugerido que una buena retroalimentación es clave para mantener alta la motivación para soportar la práctica [8].

3.4.11. Combinación de tareas de diferente dificultad.

En un programa de rehabilitación se contemplan compaginar tareas simples y tareas complejas [79]. Una tarea simple consiste en realizar una sola actividad de forma repetitiva, por ejemplo levantarse de una silla, sentarse, alcanzar un objeto, etc. Por el contrario, las complejas son aquellas que conllevan la realización de un conjunto de subtareas o actividades más sencillas para poder concluir la actividad compleja. Por ejemplo, atarse las agujetas de los zapatos es una tarea compleja que requiere de coordinación bi-manual. La incorporación de ambos tipos de tareas en las plataformas de rehabilitación basadas en realidad virtual es posible, aunque en las plataformas existentes actualmente se favorecen las tareas simples sobre las complejas. En cualquier caso, la realidad virtual permite la descomposición de una tarea compleja en sus subtareas facilitando el entrenamiento sobre la tarea completa, o de sola una de las subactividades.

3.4.12. Inmersión y presencia en el juego.

Dos conceptos básicos en la realidad virtual son inmersión y presencia. Ambos conceptos han sido definidos de diferente formas por distintos autores, pero siempre compartiendo la misma idea subyacente. La inmersión hace referencia a la capacidad de la plataforma de ser *envolvente* en todas las modalidades sensoriales, *inclusiva* al extremo de eliminar interferencias externas, y *viva* en el sentido de incorporar un alto contenido de información [67]. La presencia es más difícil de cuantificar, y hace referencia al emparejamiento entre el sentido propioceptivo y la estimulación sensorial [67]. De alguna forma la presencia es mayor cuanto mejor sea la respuesta del sistema a las acciones del usuario. Mayor inmersión y presencia a menudo resultan en una mayor captura de

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

la atención del usuario. Conseguir inmersión y presencia no es trivial, y requiere de atención a varios aspectos:

- **Representación de sí mismo (avatar gráfico).** Nos referimos a la representación virtual ya sea del paciente complete o parcialmente de la extremidad a rehabilitarse dentro del juego. Cuanto mayor realismo le demos a la representación del usuario, mayor será la activación de las neuronas espejo [7]. Nótese sin embargo, que no es necesario el foto-realismo o el audio-realismo para garantizar la inmersión [53].
- **Captura de la trayectoria de movimiento.** El seguimiento adecuado de los movimientos llevados a cabo por el paciente es indispensable para un sistema de rehabilitación. Esto ayuda en la interacción entre los juegos y el paciente. Aunque el juego es el responsable último de responder a las acciones del paciente, la captura del movimiento depende en gran medida del dispositivo de control de la plataforma, debido a que este es responsable de recibir las acciones del paciente y a menudo de retroalimentar al paciente con las estimulaciones sensoriales. Algunos dispositivos comunes son: guantes con sensores en cada dedo, o cascos de realidad virtual. En el caso de *Gesture Therapy* el control es a través de dispositivos de control diseñados *ex profeso* como la manija con un sensor de presión (gripper).
- **Sentimiento de control.** El sentimiento de control hace referencia a que cada acción realizada por el paciente en la realidad se vea reflejada en el juego. Esto nos permite estimular el sistema límbico del paciente, haciendo que se involucre más con su extremidad afectada. Por ejemplo, si el paciente mueve un brazo y presiona el mando, esto se vea como si sujetara alguno de los objetos contenidos en la escena para cambiarlo de lugar.
- **Interfaz simple y objetivos claros.** Una interfaz de usuario debe ser transparente para aquellos a los que va dirigidos el sistema para que estos puedan operar de forma natural e intuitiva el sistema [19]. Además, una interfaz transparente ayuda en gran medida a la inmersión del paciente [19]. Existe toda una disciplina de investigación dedicada a generar una mejor interfaz entre el hombre y el entorno virtual, interfaz hombre-computadora, que abarca no sólo aspectos visuales y otras modalidades sensoriales sino también aspectos psicológicos. Entre otras responsabilidades de la interfaz, a través de esta debemos proporcionar información entendible para el paciente para uso y manejo del sistema, así como para que el terapeuta pueda observar la evolución del tratamiento. En este sentido es frecuente presentar la información en forma de gráficas que facilitan su interpretación. Por otro lado, las actividades en los juegos deben ser claramente comprensibles para el sujeto [19].

3.4.13. Interés

Captar el interés del paciente puede requerir más que una interfaz atractiva, unos niveles apropiados de inmersión y presencia, o la novedad que pueda suponer un sistema de rehabilitación encapsulado en un entorno innovador como la realidad virtual. Parte del interés es resultado de un adecuado nivel de reto en las actividades. Incluir una pequeña dosis de azar y aleatoriedad en

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

los juegos puede también resultar en un incremento del interés, pero un exceso de azar conlleva a una pérdida de la sensación de control. Pero en última instancia, la captura del interés del paciente requiere de la observación de la atención prestada por el paciente a los ejercicios dictados por el terapeuta, y de la codificación de estos elementos de interés en el juego. Esto puede requerir la intervención del especialista para reconocer los aspectos críticos que estén capturando el interés del paciente. Actualmente, la mayoría de las plataformas desarrolladas, no incorporan muchos de estos elementos, por lo que retener el interés del paciente resulta a menudo problemático. En nuestra experiencia, y a posteriori del desarrollo de nuestros juegos, recibimos comentarios de nuestros terapeutas para incorporar elementos a los juegos que pudieran suscitar el interés de los niños, como por ejemplo incorporar elementos de narrativa, o aumentar el conjunto de juegos (variabilidad).

3.4.14. Autosuficiencia

Para que una plataforma de rehabilitación pueda ser utilizada sin supervisión especializada, por ejemplo en el hogar, esta debe garantizar la autosuficiencia. La autosuficiencia se refiere a la capacidad del paciente para cumplir con los objetivos de las tareas contenidas en el juego de forma autónoma. Una buena retroalimentación forma parte de la autosuficiencia, tanto con explicaciones para iniciar la tarea, como con conclusiones sobre la ejecución. Pero la autosuficiencia también se ve afectada por la interfaz. En muchas de las plataformas actuales, los juegos son sencillos y el paciente es autosuficiente para jugar a estos, pero a menudo la inicialización de los mismos no presenta el mismo nivel de autosuficiencia y requiere de un familiar o un especialista para inicializar los juegos. Una preciosa excepción es la plataforma *Elinor*, donde el paciente puede inicializar el sistema y los juegos sin ayuda de terceros.

3.4.15. Cumplimiento o compromiso y adhesión a la terapia

El compromiso o cumplimiento se refiere a que el paciente cumpla con las actividades establecidas por el especialista. A menudo, se puede observar una declinación del compromiso por elaborar las tareas en sujetos adultos causados por la depresión post-infarto [23]. Una de las claves para mantener un alto grado de adhesión a la terapia es mantener alta la motivación; las mismas técnicas que incrementan la motivación del paciente pueden ser utilizadas para mantener alto el nivel de compromiso. Además, para favorecer el cumplimiento y adhesión a la terapia, se pueden observar las dificultades que el sistema presente al paciente y reducir estas. Para ello, debemos otorgarle al paciente una oportunidad para familiarizarse con los juegos, presentando la plataforma de realidad virtual como algo fácil de operar [50].

3.4.16. Tolerancia

La tolerancia está relacionada con la dosis y duración de la terapia. En particular, hace referencia a la cantidad de tiempo invertido en los juegos. Factores que disminuyen la tolerancia incluyen el tedio o el dolor. No estamos conscientes de estudios que hayan analizado como aumentar la tolerancia a los ejercicios en plataformas de realidad virtual. Es posible que factores como la presencia de azar en los juegos, la adaptabilidad del juego para que ajuste el nivel de exigencia y la motivación, incrementen el nivel de tolerancia.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

3.4.17. Tipo y rango de movimientos cubiertos

La Tabla 3.2 resume los movimientos corporales de la extremidad superior. En una terapia tradicional se mezclan movimientos unidireccionales con movimientos multidireccionales. Los movimientos *unidireccionales*, son desplazamientos en una única dirección (arriba/abajo, derecha/izquierda). Existen juegos que promueven movimientos unilaterales, como por ejemplo el Pong. Así mismo, existen juegos que demandan movimientos multidireccionales, como por ejemplo el *Box* o el *Baseball* de la plataforma *Nintendo Wii* [49]. Además de favorecer la ejecución de los movimientos per se, las terapias también deben de favorecer la coordinación. Para ello se implementan *movimientos complejos*; que no sólo hacen énfasis en realizar los movimientos sino en tener control sobre los mismos en actividades como sujetar objetos, arrastrarlos, entre otros.

Tipo de movimiento según dirección		Tipo de movimiento según articulación	
Flexión / Extensión	Reducción (flexión) o aumento (extensión) del ángulo entre los huesos	Dedos	Flexión / Extensión
Pronación / Supinación	Giro de la palma de la mano hacia abajo (pronación) o hacia arriba (supinación)	Muñeca	Pronación / Supinación Elevación / Depresión
Elevación / Depresión	Movimiento hacia arriba (elevación) o hacia abajo (depresión)	Codo	Flexión / Extensión
Aducción / Abducción	Acercamiento (aducción) o alejamiento (abducción) del plano medio del cuerpo.	Hombro	Flexión / Extensión Elevación / Depresión Aducción / Abducción

Tabla 3.2 Movimientos corporales de la extremidad superior

Además de cumplir con los tipos de movimientos requeridos, los juegos deben permitir que estos movimientos se lleven a cabo con distinto alcance o *rango*. Aquellos pacientes con discapacidades más severas pueden tener un alcance máximo de algunos milímetros, mientras que los pacientes menos afectados pueden tener un alcance casi comparable al de sujetos sanos. En este sentido, varias plataformas, entre ellas *Gesture Therapy*, proporcionan un sistema de calibración que determina el alcance del movimiento y mapea dicho alcance a toda la pantalla. Además, otras plataformas, y de nuevo *Gesture Therapy* entre ellas, son capaces de adaptarse a los cambios de rango mediante la implementación de algoritmos de adaptabilidad.

3.4.18. Tratamiento de la compensación de movimientos

La compensación del movimiento hace referencia al empleo por parte del sujeto enfermo de una alternativa a su extremidad afectada para completar una tarea [40]. Esto no es recomendable para algunas escuelas como la de Bobath [27] que sugieren que haciendo esto no se logra recuperar con éxito la conexión del lado afectado. No obstante, la evidencia más reciente sugiere que el papel que juega la compensación es más complejo [46]. Acorde a Kwakkel et al [41], en los pacientes para los que se espera lograr un determinado grado de destreza motriz, se debe descartar la compensación y fomentar el reentrenamiento de las funciones; mientras que para aquellos pacientes para el pronóstico de recuperación motriz es pobre, el énfasis debe ser en conseguir la realización de las funciones y lograr un movimiento del brazo afectado confortable, y por tanto la compensa-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

ción debe ser aceptada. No obstante, la evidencia sugiere que entrenar con algún movimiento del tronco limita la recuperación del brazo [55, 47].

3.4.19. Actividades funcionales y de la vida cotidiana

El objetivo final de la terapia de rehabilitación motriz es recuperar la destreza motriz en el paciente, y por ende favorecer la independencia del paciente de terceros. Este nivel de independencia suele medirse en función de la capacidad del sujeto de llevar a cabo de forma autónoma tareas funcionales y actividades de la vida diaria (ADL por sus siglas en inglés). Una plataforma de rehabilitación basada en la realidad virtual debe proporcionar la oportunidad para que los pacientes practiquen este tipo de actividades y que lo hagan en un entorno seguro y controlado. Tareas como preparar una taza de café puede conllevar una dosis de peligro si se intentan reentrenar directamente en el mundo real, pero pueden ser reentrenadas en un entorno virtual sin riesgo para el paciente.

Las computadoras ofrecen la capacidad de simular situaciones cotidianas mediante la realidad virtual. Los diseñadores de juegos deben desarrollar juegos que simulen estas actividades comunes para el sujeto para reentrenarlos en sus actividades cotidianas y evaluar su desempeño [25]. Tareas típicas de la vida diaria incluye vestirse, alimentarse y/o transportarse de un lugar a otro. En la mayoría de los sistemas de rehabilitación, las tareas que se plantean en ellos están encaminadas hacia este tipo de actividades [8]. Una tarea común en rehabilitación con realidad virtual, es por ejemplo alcanzar y agarrar un objeto.

3.5. TAXONOMÍA DE CRITERIOS.

El conjunto de criterios resumidos en el punto anterior forman la base de la taxonomía que se presenta a continuación. Estos criterios deben ser cubiertos en mayor o menor medida por aquellos juegos destinados a ser parte de una terapia de rehabilitación a fin de maximizar el impacto de los mismos en la recuperación motriz del individuo.

En esta sección, proponemos una nueva taxonomía de criterios para el desarrollo de juegos de rehabilitación. Para ello, hemos dividido los criterios en cinco grupos: *parámetros clínicos de la terapia, motivación, estado inicial del sujeto, repetición de movimientos y tareas significativas*, en base a lo siguiente:

- El estado inicial del sujeto es necesario para observar el punto de partida del tratamiento analizando su estado físico y psicológico, evitando actividades que puedan dañar su integridad.
- Los parámetros clínicos en la terapia permiten observar el rendimiento del sujeto durante el juego y la administración de la terapia en general.
- La motivación juega un papel importante en una terapia y más aún en la basada en juegos. La motivación es quizás la responsable última del apego y la adhesión a la terapia.
- La repetición de movimientos es uno de los pilares básicos de la rehabilitación. La repetición de los movimientos sienta las bases para alcanzar una reorganización cerebral ade-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

cuada reentrenando la extremidad afectada, siendo esto el objetivo principal de una terapia de rehabilitación.

Asegurar que las tareas tienen sentido o en otras palabras que sean tareas significativas, favorece la independencia del paciente en las actividades de la vida diaria.

ESTADO INICIAL	PARÁMETROS CLINICOS DE LA TERAPIA	MOTIVACIÓN / COMPROMISO.	REPETICIÓN DE MOVIMIENTOS	SENTIDO / TAREAS SIGNIFICATIVAS.
<ul style="list-style-type: none"> • Edad. • Destreza Motora. • Depresión post-ictus / Fisiológica. <ol style="list-style-type: none"> 1. Nivel de fatiga. 2. Nivel de depresión. <ul style="list-style-type: none"> • Estilo de vida. • Grupos de apoyo (familia, etc.). • Estado de comorbilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventana de oportunidad. • Adaptación al paciente. • Sesión. <ol style="list-style-type: none"> 1. Agentes activos. 2. Intensidad, Frecuencia y repetición. 3. Nivel de capacidad (carga de trabajo). 4. Duración. 5. Retroalimentación adecuada. 6. Tareas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inmersión en el juego. <ol style="list-style-type: none"> 1. Representación de sí mismo (Avatar gráfico). 2. Sentimiento de control. 3. Representación de sus movimientos en el juego. 4. Interfaz simple y objetivos claros. <ul style="list-style-type: none"> • Interés. • Autosuficiencia / Tolerancia. • Cumplimiento / compromiso. • Tolerancia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de movimientos cubiertos. • Reducción de compensación de movimientos. • Rango de movimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Actividades de la vida cotidiana. • Actividades funcionales.

Tabla 3.3 Taxonomía de criterios para el diseño de juegos de rehabilitación.

La Tabla 3.3 presenta la estructuración de nuestra taxonomía acorde a la división establecida. Los criterios de desarrollo detallados en la sección anterior se distribuyen entre las categorías según su capacidad de impactar sobre dicha categoría. No obstante, esta división no es estricta, y varios de los criterios podrían afectar a más de una categoría.

3.6. DESARROLLO DE UN CUESTIONARIO PARA EVALUACIÓN DE LA ADHESIÓN DE LOS JUEGOS DE REHABILITACIÓN A LOS CRITERIOS DE DESARROLLO.

Una vez establecidos los criterios que debe incorporar un juego serio para rehabilitación, es conveniente contar con una herramienta que permita evaluar la adhesión y el cumplimiento de los juegos con estos criterios. A tal fin, se ha elaborado un cuestionario con preguntas enfocadas a calificar el apego con que los juegos cumplen con dichos criterios. Antes de presentar el cuestionario, repasamos algunas escalas y métricas que se han utilizado para (i) medir la destreza motriz del paciente, y (ii) medir la función fisiológica del sujeto. Se resumen además los tipos de escalas que suelen conformar los cuestionarios para cuantificar elementos a priori subjetivos. En este sentido,

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

las medidas son un componente esencial en la experimentación científica, permiten valorar o comparar variables en experimentos. La medición es una estandarización de una observación [79].

3.6.1 Escalas de evaluación de la destreza motriz de los pacientes en rehabilitación.

La cuantificación de la destreza motriz de un paciente en rehabilitación es una componente importante a la hora de evaluar el avance de la terapia y tomar decisiones sobre la dirección de la misma. La evaluación de la destreza motriz es multifactorial convergiendo elementos de la calidad del movimiento, fuerza aplicada, o nivel de fatiga entre otros normalmente medidos por comparación contra el promedio de una población sana. Varias alternativas están disponibles para la evaluación de la destreza motriz, algunas de las cuales describimos brevemente a continuación.

- *Índice de motricidad*. Es una medida empleada para evaluar el funcionamiento de la extremidad afectada. Hace un énfasis especial en el rango de movimiento. Se evalúan desplazamientos como la flexión del codo, y la abducción del hombro, así como la pinza fina². Cada uno de estos tres criterios toma un valor en una escala de 0 a 33 en pasos discretos permitiendo una puntuación máxima de 100 [59].
- *Escala de Fugl-Meyer* [43, 59]. Quizás una de las escalas más utilizadas para medir la destreza motriz. Valora aspectos de movimiento, coordinación y dolor dando una puntuación de 0 a 66.
- *Escala de Evaluación motora* [79]. Evalúa la capacidad funcional del paciente. Comprende de ocho puntos: posición boca arriba de manera horizontal, acostado para sentarse sobre un lado de la cama, el balance cuando se encuentra sentado, sentado para levantarse, caminar, funcionamiento de la extremidad superior; movimientos de la mano y movimientos avanzados de la mano.
- *Action Research Arm Test (ARAT)* [58]. El ARAT es una escala de 19 elementos agrupados en 4 categorías; agarre, atenzamiento, pinzamiento (con dos dedos) y movimiento burdo del brazo. Cada elemento puntúa de 0 (Incapaz de realizar la acción) a 3 (Realiza la acción con normalidad) para un máximo de 57 puntos. Se evalúan tanto la destreza, como la coordinación, pero también la funcionalidad de la extremidad así como las actividades de la vida diaria.
- *Medical Research Council Scale* [79]. Está enfocada a cuantificar la fuerza muscular. Con esta escala se observa la cantidad de fuerza impresa al movimiento realizado por el sujeto durante una acción. El esfuerzo del paciente se califica mediante un valor de 0 (Sin movimiento) a 5 (contracción muscular normal contra resistencia completa).
- *9-Hole Peg Test* [4]. Es un test diseñado para medir la destreza de los dedos. Esta prueba consiste en insertar una serie de clavijas tomadas de un contenedor en agujeros y luego sacar las clavijas de los agujeros y volverlas a guardar en su contenedor tan rápido como sea posible. La puntuación depende del tiempo necesitado para ejecutar la tarea.

² Sujetar un objeto con el pulgar y el dedo índice [Dra. Paloma Álvarez, comunicación privada].

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- *Test Évaluant la performance des Membres supérieurs des Personnes Agées (TEMPA)* [38]. Busca evaluar el rendimiento de la extremidad superior haciendo énfasis en la ejecución de tareas funcionales y de la vida diaria. El test consiste en la realización de 9 tareas: 5 bimanuales (abrir un tarro y tomar una cuchara de café, abrir un candado, abrir un pastillero, escribir sobre un sobre y poner un sello, y barajar una baraja de cartas) y 4 unimanuales (agarrar y mover una jarra, servir líquido en un vaso, insertar unas monedas en una abertura y desplazar pequeños objetos). El tiempo límite para cada una de las actividades es de 120 segundos. El puntaje varía entre 0 (tarea realizada con éxito) a -3 (tarea incompleta) calificando 5 dimensiones; fuerza, rango de movimiento, precisión de movimientos amplios, precisión de movimientos finos y prensión.

Esta lista anterior no es exhaustiva. Existen otras escalas para la medición de la destreza motriz del paciente como: *Frenchay Arm Test*, *Box Block Test* y *Perdue Pegboard Test*. Algunas escalas que evalúan la motricidad y la fuerza del sujeto son: *NIH Stroke Scale*, *Orpington Prognostic Scale* y *Hand and Pinch Dynamometer Scores*.

3.6.2 Escalas de evaluación de la función fisiológica de los pacientes en rehabilitación.

Si bien el objetivo central de una terapia de rehabilitación motora es indudablemente mejorar la destreza motriz del paciente, la administración de la terapia se puede ver afectada por las condiciones fisiológicas del paciente. En este sentido, a menudo de forma concomitante con las escalas de destreza motriz también se aplican otras escalas que evalúan la función fisiológica del paciente, analizando entre otras la influencia de la fatiga en las actividades realizadas, midiendo parámetros tales como el impacto, la duración y la severidad. A continuación se mencionan algunos ejemplos de estas escalas colaterales [54]:

- *Fatigue Impact Scale* [21]. Evalúa la severidad, la duración y la frecuencia de la fatiga. Se evalúan 40 elementos que describen las vertientes cognitivas (concentración, memoria, organización mental), físicas (motivación, esfuerzo, coordinación, resistencia) y psicosociales (aislamiento, emociones, carga de trabajo, y comprensión) de la fatiga. Cada elemento es valorado entre 0 (sin problema) y 4 (extremadamente difícil). Hoy existen varias versiones modificadas de este test.
- *Visual Analogue Scale* [13]. El objetivo de esta medida psicométrica nos permite analizar de manera subjetiva el estado de ánimo, dolor y estado de salud del paciente. Se establece si el paciente se encuentra fatigado y es marcado como “Muy fatigado” o “No fatigado”.
- *Escala de depresión geriátrica* [36]. Desarrollada para cuantificar la depresión en adultos mayores. Consiste en un cuestionario de 30 preguntas de respuesta binaria (si/no). La puntuación final está escalonada: 0 a 9 representa normalidad, 10 a 19 representa una depresión leve y 20 a 30 una depresión severa.
- *Intrinsic Motivation Inventory or Scale* [61, 52]: Evalúa 6 dimensiones relacionadas con la motivación del paciente cuando este ejecuta una tarea: interés, competencia, esfuerzo,

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

utilidad, presión soportada y tensión. Cada una de las dimensiones o subescalas consta de un número diferente de elementos evaluadores. Se ha sugerido que la subescala de interés es de por sí, la que realmente mide la motivación.

De nuevo, esta lista no pretende ser exhaustiva, sino simplemente poner de manifiesto dimensiones colaterales a la destreza motriz en una terapia de rehabilitación.

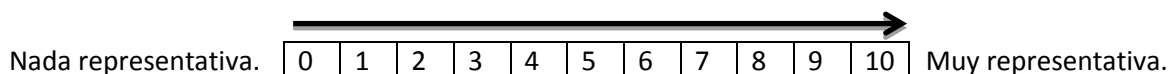
3.6.3 Escalas para cuantificar elementos subjetivos a través de cuestionarios

Las escalas que se han descrito anteriormente evalúan ya sea la destreza motriz o algún aspecto fisiológico del paciente. A menudo estas escalas son de por sí cuestionarios validados con un número variable de preguntas. Cada una de estas preguntas intenta cuantificar alguna variable inherentemente subjetiva. Para traducir este valor subjetivo a una métrica cuantitativa existen diferentes estrategias, a su vez llamadas escalas. En esta sección, repasaremos algunas de estas estrategias de cuantificación, y las ejemplificaremos con muestras del cuestionario que pretendemos construir para evaluar el apego de los juegos desarrollados para rehabilitación a los criterios de diseño de nuestra taxonomía.

- Escala de clasificación continua.** La opinión del entrevistado se evalúa acorde a varias opciones de respuesta escalonadas, ya sea con clasificaciones verbales o numéricas. En el caso de la evaluación del apego de los juegos a los criterios de diseño se utilizará una clasificación numérica. Por ejemplo.

Inmersión en el juego.

Indique en la línea de abajo que tan representativa es la imagen de la extremidad afectada.



- Escala Likert.** La escala Likert se utiliza para determinar el grado de acuerdo o desacuerdo del entrevistado con un determinado enunciado referente a lo que se pretende evaluar. El entrevistado selecciona el grado de acuerdo más adecuado a su opinión. Por ejemplo:

Ventana de oportunidad.

Seleccione la opción adecuada que tan “de acuerdo” esta, de las siguientes afirmaciones.

	Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Más o menos.	En desacuerdo.	Totalmente en desacuerdo.
Los juegos me dan la oport-					

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

tunidad de recuperarme mejor.					
Es un excelente complemento en la terapia.					
No me produce ningún malestar físico al realizar la actividad.					
Me ayuda a recuperarme fácilmente.					

- **Diferencial Semántico.** Diseñada para medir el significado de las connotaciones, se utiliza para evaluar los estímulos en forma de atributos o adjetivos contrapuestos. Las connotaciones permiten deducir la actitud del entrevistado hacia el elemento cuestionado. Por ejemplo:

Tareas significativas.

Para usted la actividad fue:						
	1	2	3	4	5	
Tediosa.						Entretenida.
No se asemeja a la realidad.						Se asemeja bastante a la realidad.
Monótona.						Dinámica.
Inadecuada.						Adecuada.
No ayuda en nada.						De gran ayuda.

- **Escala de Stapel.** Este tipo de escala es una variante del diferencial semántico también para medir la actitud hacia un elemento. Los estímulos se evalúan de forma similar pero en este caso no son bipolares como en la diferencial semántica, sino que la valoración de estos estímulos se realizará de forma individual (un solo adjetivo en el centro) con una apreciación positiva o negativa. Por ejemplo.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Interés.

Se evaluará la atención que la persona le da al juego, será una escala de -5 a 5 entre más alta sea la puntuación, más positiva será. Marcar con una X.

Distracción de la persona		5	Interés por cumplir el objetivo de la tarea.		5
		4			4
		3			3
		2			2
		1			1
		0			0
		-1			-1
		-2			-2
		-3			-3
		-4			-4
		-5			-5

3.7. ELABORACIÓN DE UN CUESTIONARIO PARA LA EVALUACIÓN DEL APEGO DE JUEGOS PARA REHABILITACIÓN A LOS CRITERIOS DE DISEÑO

Una vez descritos los criterios de diseño que deben reunir los juegos para rehabilitación, y su organización en una taxonomía, hemos descrito formas en que se evalúan variables subjetivas, y hemos recogido formas de cuantificar dichas percepciones subjetivas. Con esto, ya tenemos los elementos necesarios para desarrollar una herramienta de evaluación del apego de los juegos para rehabilitación a los criterios de diseño.

Un cuestionario que cuantifique apropiadamente dicho apego debe resultar en valores o puntuaciones más altas para aquellos juegos que más adhesión demuestren a estos criterios, en otras palabras a juegos idóneos para rehabilitación. De la misma forma, este cuestionario, debe resultar en puntuaciones bajas para aquellos juegos cuya finalidad no es la rehabilitación, y que de una u otra forma su aplicación en la rehabilitación no resultaría en una mejora de la destreza motriz del paciente, léase los juegos lúdicos.

Aunque el cuestionario completo se presenta en el Apéndice 2, en esta sección se describe brevemente a grandes rasgos las características de este cuestionario.

El cuestionario pretende determinar el apego de los juegos a los criterios recogidos en la taxonomía. De forma colateral, el cuestionario debería ser capaz de discriminar a aquellos juegos desarrollados expresamente para ser utilizados en terapias de rehabilitación de aquellos juegos enfocados al entretenimiento.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

El tipo de preguntas que contiene nuestra herramienta de evaluación son: *Likert*, *diferencial semántico*, *Stapel* y de *clasificación continua*. Lo que se pretende es acreditar las siguientes categorías:

- *Parámetros clínicos de la terapia*: Esta sección del cuestionario evalúa si los juegos son aceptados por los sujetos como una parte de su tratamiento, observando si la sesión fue demasiado exhaustiva, si le costó demasiado trabajo en terminar la actividad, etc.
- *Motivación / compromiso*: Determina si los sujetos estiman los juegos como atractivos, y observa el nivel de interés por los juegos y en que tanto ayuda a que la persona se comprometa a cumplir con la terapia.
- *Repetición de movimientos*: Esta sección del cuestionario estima si los desplazamientos que cubiertos en el juego son los adecuados para su recuperación en concordancia con la terapia y que esto sean del rango adecuado a su movilidad.
- *Sentido / tareas significativas*: Esta es la parte del cuestionario que determina si para el individuo las actividades planteadas tienen un significado.

En particular, el Apéndice 3 recoge la relación entre las distintas preguntas y su categoría taxonómica correspondiente.

3.8. CONCLUSIONES.

Este capítulo ha resumido aquellos elementos relevantes a la hora de diseñar de juegos serios enfocados a rehabilitación. Para cada criterio, de forma sistemática (i) se ha indicado su valor en la rehabilitación y (ii) se ha expuesto como podrían ser incorporados o tenidos en cuenta en los juegos, esto último en ocasiones mediante ejemplos ya existentes. Esta colección de criterios debe guiar el diseño de los juegos haciendo de estos una herramienta válida en la recuperación motriz de la extremidad afectada. No obstante, el apego a los mismos es condición necesaria pero no suficiente para garantizar que un juego resultará en una mejora de la destreza motriz del paciente. Una vez presentados los criterios, estos han sido tabulados en una de las contribuciones de esta tesis; una taxonomía de criterios de desarrollo de juegos serios para rehabilitación.

El objetivo principal de cualquier terapia de rehabilitación motriz es mejorar la destreza del paciente para llevar a cabo tareas de la vida diaria. En este sentido, existen un buen número de escalas diseñadas para medir este avance. Este capítulo ha resumido algunas de estas indicando el enfoque de las mismas y la forma en que obtienen su puntuación. De manera aldeaña, hemos repasado otras escalas destinadas a cuantificar otros aspectos necesarios en la recuperación del paciente como su motivación y su nivel de fatiga. Este tipo de escalas nos presentan las opciones existentes a la hora de diseñar un cuestionario o escala para cuantificar algún elemento subjetivo. El capítulo incluye algunas de las escalas de cuantificación más comunes usadas en los cuestionarios.

Pero para verificar si los juegos se apegan a los criterios de desarrollo, deben ser sometidos a una serie de evaluaciones mediante un cuestionario. Estas deben ser medidas por una serie de escalas

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

que indique su efectividad de dos formas: clínicamente y a nivel de software. El cuestionario se organiza en bloques que evalúan diferentes aspectos de los juegos. A grandes rasgos, estos bloques evalúan (i) los aspectos técnicos del juego, (ii) la motivación que estos despiertan en el usuario, (iii) el soporte que el juego ofrece a la terapia, y (iv) el aspecto social del juego.

Con las herramientas desarrolladas en este capítulo; criterios, taxonomía, escalas y cuestionario, estamos preparados para afrontar el desarrollo del sistema propiamente.

Capítulo 4 .

Desarrollo del

Paquete de juegos para *Gesture Therapy*.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Un motor de juegos es un conjunto de clases y/o rutinas enfocadas a facilitar el diseño y el desarrollo de juegos de computadora. Este capítulo abre con una breve descripción de algunos de los motores que existen para la creación de juegos de computadora. Repasaremos las características de estos motores, y se justificará la elección del motor de juegos Torque como base para el desarrollo de nuestro sistema.

El núcleo principal del capítulo expone el sistema que se ha desarrollado bajo este proyecto de investigación; un paquete de juegos de rehabilitación para la plataforma *Gesture Therapy*. Brevemente se describe la arquitectura y se dan algunos detalles de la implementación de la plataforma *Gesture Therapy* que nos contextualicen como se deben incorporar el paquete de juegos. A continuación se detallan los requerimientos funcionales y no funcionales, así como la interacción de cada una de las funciones dentro del juego. Finalmente se describen los juegos desarrollados.

Este capítulo engloba a la parte computacional de la tesis. El desarrollo se presenta de una forma laxa sin acogerse estrictamente a los lineamientos de ingeniería del software a fin de enfatizar los retos conceptuales del desarrollo de juegos serios para rehabilitación sobre los retos técnicos del diseño e implementación.

4.2. MOTORES DE JUEGOS.

Un motor de juegos es una herramienta la cual nos ayuda al desarrollo de juegos para computadora, dispositivos móviles y consolas caseras. Un motor de juegos provee de funcionalidades básicas comunes en el ámbito como son el modelado de la física de los objetos, las partículas, el desarrollo de las animaciones, el control de colisiones, las capas y la velocidad de desplazamiento de los objetos dentro de ella, entre otras. Todos estos elementos ayudan a generar un mundo virtual de forma rápida y eficiente. Los distintos motores existentes incorporan todas o algunas de estas funcionalidades diferenciándose entre ellos por las características que implementan: *modelado 2D/3D, iluminación, visibilidad, texturas, efectos, APIs*, entre otras.

A la hora de decidir por uno u otro motor de juegos, tomaremos en cuenta algunos elementos que describimos a continuación:

- *Plataforma*. La plataforma es el sistema operativo sobre el cual se implementan los juegos. Generalmente todos los motores tienen versiones bajo *Windows*, que es el sistema operativo bajo el cual opera la plataforma *Gesture Therapy* y por tanto donde nos interesa desarrollar nuestro paquete de juegos.
- *Modelado*. Las herramientas de modelado son aquellas que se utilizan para crear las figuras o mallas que conforman los objetos dentro del juego. El modelado puede ser plano (en 2D) o volumétrico (en 3D), y el resultado puede ser o no fotorrealista. Los distintos motores pueden incorporar sus propias herramientas de modelado o bien depender de herramientas externas como *MAYA, 3D Studio Max, o Blender*. Por ejemplo el modelado

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

de malla consiste en la elaboración de una serie de polígonos de manera conjunta formando contornos para la creación ya sea de paisajes o formas orgánicas; algunas herramientas empleadas para este tipo de modelado son *3D Studio Max*, *Blender*, entre otras herramientas. Otro ejemplo que podemos ver es el modelado *LOD discreto* empleado para crear escenarios debido a que se realizan el modelado de los objetos de manera dinámica; es decir, se generan los objetos conforme el sujeto avanza por el escenario, esta herramienta es empleada por *Ogre*, *Crystal 3D*, entre otros.

- *Texturas*. Las texturas son plantillas empleadas para dar aspecto a los objetos. En concreto, una textura es una imagen (*bitmap*) que se asigna a una superficie o área de un gráfico generado por computadora. Las texturas a mano representadas representan distintos materiales: madera, piel humana y animal, piedra, etc. El uso de las texturas permite definir el aspecto de los objetos; más realista o más de dibujo animado por ejemplo. Un uso adecuado de las texturas puede atrapar la curiosidad del usuario hacia los juegos. Formatos comunes para la descripción de las texturas son *jpg*, *bitmap*, y *png* entre otros. La mayoría de los motores permiten la utilización de diferentes formatos como *Illich*, *Unity*, *XNA Games*.
- *Efectos*. Los efectos ya sean sonoros o visuales animan pequeñas acciones y/o eventos que ocurran en el juego; explosiones, colisiones, recompensas, etc. Una forma común de manejar los efectos visuales es por medio de un sistema de partículas; este tipo de efectos que es de gran utilidad para simular explosiones, crear fuego, humo, relámpagos, etc. La mayoría de los motores cuenta con algún soporte para la creación de los efectos.
- *Iluminación*. La iluminación contribuye a obtener una mejor inmersión en los juegos. El sistema de iluminación controla las fuentes de luz, proyecta las sombras y determina las transparencias. El control de la iluminación es más frecuente en los motores 3D como *Illich*, *XNA Games*, *Unity* u *Ogre*. En cuanto a las fuentes de iluminación algunos motores incorporan alumbramiento dinámico como *XNA Games* e *Illich*. La proyección de sombras puede lograrse mediante diferentes técnicas; alguno de estos motores cuenta con mapeo de sombras o sombras en tiempo real e incluso con sombras dinámicas por medio de un buffer de plantillas. Algunos motores como es el caso de *Illich* tiene incluso la capacidad para controlar las transparencias.
- *Documentación*. La documentación (técnica y de usuario) facilita la programación de juegos con el motor. Para hacer un buen uso del motor es necesario contar con una amplia documentación y numerosos ejemplos para entender el funcionamiento del motor. Todos los motores evaluados cuentan con algún tipo de información, ya sean tutoriales, libros y/o guías en internet, así como comunidades de usuarios.
- *Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, Graphic User Interface) y Entorno de desarrollo integrado (IDE, integrated development environment)*. Aunque la funcionalidad de un motor no viene

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

determinada por el hecho de proveer una interfaz gráfica o un entorno de desarrollo, la presencia de estos entornos de desarrollo facilita la tarea del programador proporcionando un acceso rápido a los elementos del motor. Como en cualquier otro dominio, una GUI debe ser lo más transparente e intuitiva posible. Algunos motores cuentan con GUI como *Ilrich*, *Unity*, *Unreal*. Otros no contienen estos elementos y simplemente proveen de una interfaz de programación de aplicaciones (*API*, *Application Programming Interface*) como el caso de *XNA Games*.

Actualmente existe una amplia gama de motores de juegos, ya sean comerciales o de libre distribución. Cada motor ofrece diferentes ventajas e inconvenientes. Antes de decidir por un motor u otro, para esta tesis se llevó a cabo una pequeña revisión de algunos de estos motores evaluando las características antes mencionadas. En particular para esta tesis prestamos atención a los siguientes motores: *Unity*, *Ogre*, *Torque Game Builder*, *XNA*, *Ilrich*. La Tabla 4.1 resume las características de estos. No obstante, aparte de los aquí seleccionados existen otros muchos motores: *Unreal*, *Nebula*, *Flat Red Ball*, *Darkbasic*, *Flash* o *Scrolling Game Developed*, entre otros.

4.2.1. Torque vs otros motores gráficos.

Para el desarrollo de los juegos para rehabilitación seleccionamos el motor de juegos Torque, el cual se describe en la sección 4.3. TORQUE GAME BUILDER., La elección de motor de juegos sobre otros se basa en las siguientes razones:

- El código del motor es abierto, y modificable.
- Incorpora una interfaz gráfica de usuario de sencillo e intuitiva en el manejo. Debido a que por medio de esta se pueden manipular distintas propiedades tanto de los objetos como de la escena desde la interfaz gráfica. Y esto nos ahorra líneas de código en alguno de los casos.
- No ocupa demasiados recursos de la computadora para su operación en comparación con los motores como *Unity*, *Ilrich*, u *Ogre*.
- Aunque Torque está enfocado al diseño 2D, incorpora el control de la perspectiva y simula el efecto de la profundidad. Para ello, Torque altera el tamaño del objeto cuando se agregan coordenadas a lo largo del eje Z. El sistema de visión de la plataforma *Gesture Therapy* actualmente estima la profundidad de brazo a partir de un sistema monoscópico.
- No requiere de software externo como puede ser el caso de *3D Studio* o *Maya*. No obstante, para generar las animaciones, se pueden emplear programas externos que realicen *morphing*; que consiste en realizar una animación por computadora para transformar una imagen a otra.
- En 2D hay la posibilidad de utilizar fotografías y pudiéndose alcanzar el mismo fotorealismo que en diseños 3D.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Motor	Licencia	Iluminación	Texturas	Efectos	Soporte y Documentación.	GUI / IDE	Lenguaje de programación.	Modelado	web
Irrlich	Gratuito	Luces dinámicas. Superficie de agua animada. Sombras dinámicas. Mapa de luces. Objetos transparentes.	Formatos de textura: jpg, bmp, psd, png, etc.	Sistema de partículas personalizable	Tutoriales y documentación acerca de la API.	Interfaz en 2D.	C++, visual studio.	Esqueletos de animación.	http://irrlicht.sourceforge.net/
Unity	Versión gratuita y profesional con costo.	Mapeo de luces. Sombras en tiempo real.	Formatos de textura: jpg, png, etc., pueden editarse en el sistema	Sistema de partículas.	Tutoriales y además con una comunidad para resolver dudas.	Cuenta con interfaz de usuario	Scripts		http://unity3d.com/
XNA Games	Gratuito para fines académicos.	Mapeo de sombras. Luces dinámicas. Objetos transparentes	Formato de texturas: jpg, bmp, etc.	Motor de partículas.	Libros, tutoriales, comunidad de usuarios.	Emplea la interfaz de visual studio.	Lenguajes soportados por visual studio como c#, c++.	Modelado en Maya, Blender, AutoCAD.	http://msdn.microsoft.com/en-us/centrum-xna.aspx
Ogre	Gratuito.		Formato de texturas: jpg, png, bmp, TGA, DDS.	Sistema de partículas.	Manual de la API, libros, comunidad de usuario.	No cuenta con interfaz debido a que es una API.	C++; visual C++	Modelado de malla. LOD. Soporte de animación por esqueleto.	http://www.ogre3d.org/
Torque Game Builder	Tiene costo.	No cuenta con sistema de iluminación debido a que es un motor para 2D.	Cuenta con soporte para textura.	Sistema de partículas propio.	Libros, Tutoriales, comunidad de usuarios.	Interfaz en 2D (Torsion y Torque Game Builder).	TorqueScript.	No cuenta con un modelado, se emplean imágenes o fotografías, para los objetos en 2D.	http://www.garagegames.com

Tabla 4.1 Motores de juegos analizados para este trabajo.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

4.3. TORQUE GAME BUILDER.

Torque Game Builder (o simplemente *Torque*) es una plataforma para el desarrollo de juegos en 2D, adquirida recientemente por *Garage Games* [24]. El proceso de desarrollo de los juegos se materializa a través de una interfaz gráfica (Figura 4.1) de fácil manejo. En esta interfaz el acceso a los valores de los atributos de los objetos es visual. Además de a través de esta interfaz, el usuario tiene por otro lado la opción de trabajar con scripts empleando un entorno de desarrollo conocido como *Torsion* (Figura 4.2). La programación de los scripts bajo *Torsion* permite un control adicional sobre los objetos contenidos en el juego.

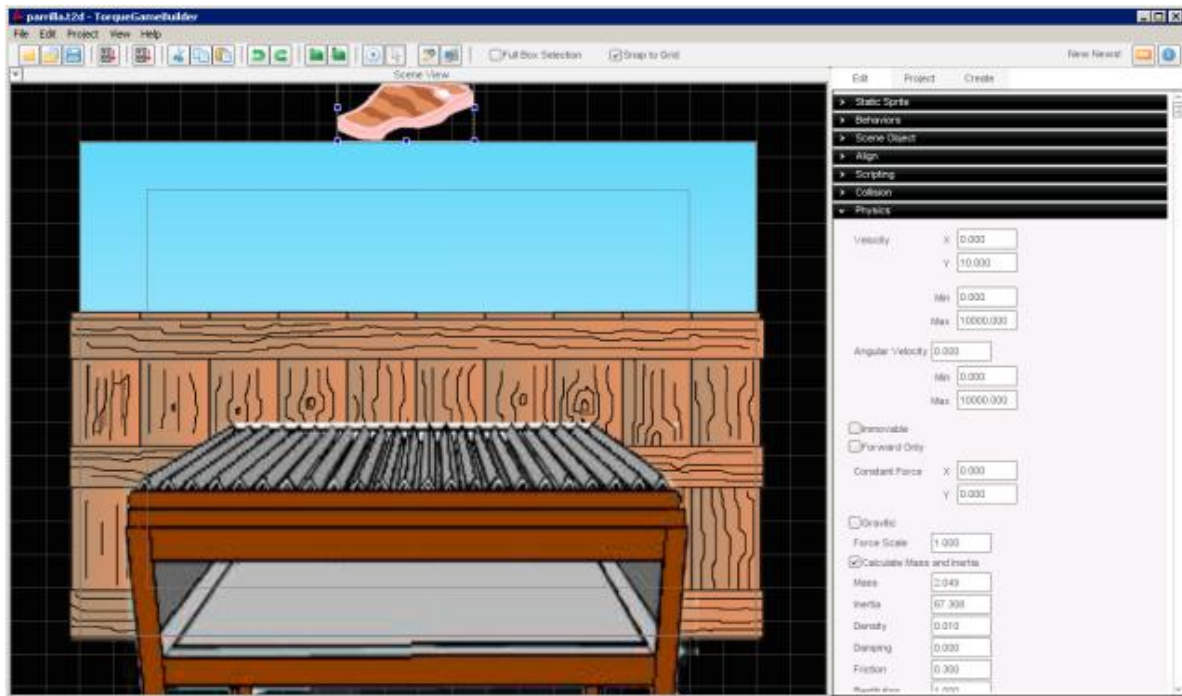


Figura 4.1 Interfaz de Torque Game Builder

Entre las herramientas proporcionadas por Torque se incluyen los sistemas de partículas para la generación de efectos, un sistema de colisiones, control sobre la física de los objetos, selección y control de animaciones procedurales, control de la cámara, entre otras.

Del motor Torque existen versiones para las diferentes plataformas, como *XBOX 360* o *iPhone*. Además existe una versión para desarrollo de juegos en 3D independiente de la utilizada en esta tesis.

Torque emplea un lenguaje de scripts (*TorqueScript*) aunque también se pueden implementar funciones creadas en *C++* instanciándolas con el lenguaje propio del motor. Para crear nuevos objetos o nuevos métodos en *C++* se tiene que trabajar desde dentro del núcleo del motor (modificando dicho núcleo). Torque además ofrece la capacidad de reutilizar recursos de

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

diferentes proyectos generados con anterioridad, como sonidos, animaciones y texturas, entre otros recursos.

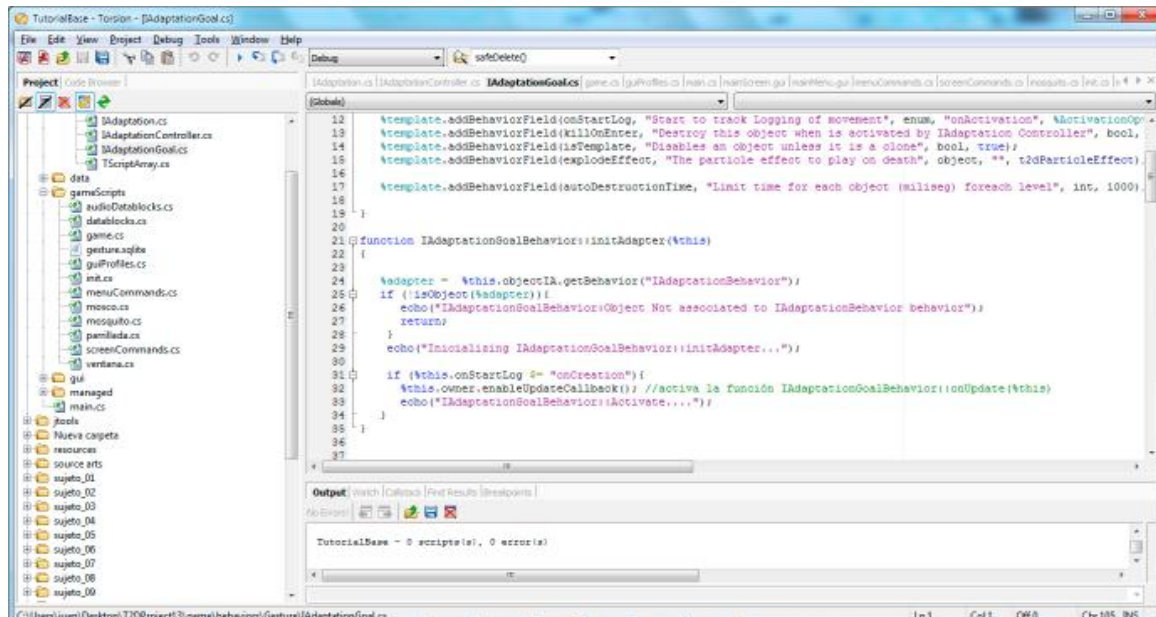


Figura 4.2 Interfaz gráfica del entorno de desarrollo *Torsion*. *Torsion* incorpora el acceso a un compilador de *TorqueScript* el lenguaje utilizado por *Torque*.

4.4. PLATAFORMA “GESTURE THERAPY”

Gesture Therapy [6, 69] describe un concepto de terapia basada en realidad virtual que enmascara los ejercicios de rehabilitación que se llevan a cabo en las terapias tradicionales bajo una serie de juegos serios. A la vez, *Gesture Therapy* también hace referencia a la plataforma hardware y software que hace realidad este concepto. Como plataforma, *Gesture Therapy* tiene una arquitectura conceptualmente estructurada en módulos pero implementada en distintas partes. Esta sección desglosa la arquitectura de la plataforma *Gesture Therapy* y describe detalles de la implementación que son necesarios conocer para el desarrollo del paquete de juegos central a esta tesis.

Conceptualmente los módulos de la plataforma de *Gesture Therapy* son;

- El *sistema físico* que incorpora todos los elementos hardware, incluyendo el PC, la cámara y los controladores.
- El *sistema de visión* que estima la posición del brazo, recibe entradas de los controladores.
- El *detector de compensación* que monitorea la posición del usuario y emite una alarma o bloquea el sistema si detecta una posición incorrecta.
- El *módulo de adaptación* que provee de una política de ajuste del nivel de dificultad de los juegos.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- El *entorno virtual simulado* responsable de visualizar las actividades de la terapia, y presentar la retroalimentación.

Aunque la incorporación de los juegos sea sobre el entorno virtual simulado, los juegos deben comunicarse con el sistema de visión para recibir las acciones de control y con el módulo de adaptación que determinará la evolución del nivel de dificultad de los juegos. Básicamente, el sistema de visión recibe como entrada un video desde la cámara y datos de presión desde los controladores. El sistema de visión extrae del video la posición del brazo y de la mano y pasa esta información junto con la información de la presión al entorno virtual. El entorno virtual es responsable de la visualización correcta de los juegos y de responder a las acciones del usuario. El mismo entorno virtual recoge estadísticas de comportamiento, como velocidad y precisión en el movimiento, que son comunicadas al módulo de adaptación. El módulo de adaptación procesa esta información y decide si subir, bajar o mantener el nivel actual de dificultad del juego. Esta decisión se comunica de vuelta al entorno virtual que se encarga de ejecutarla.

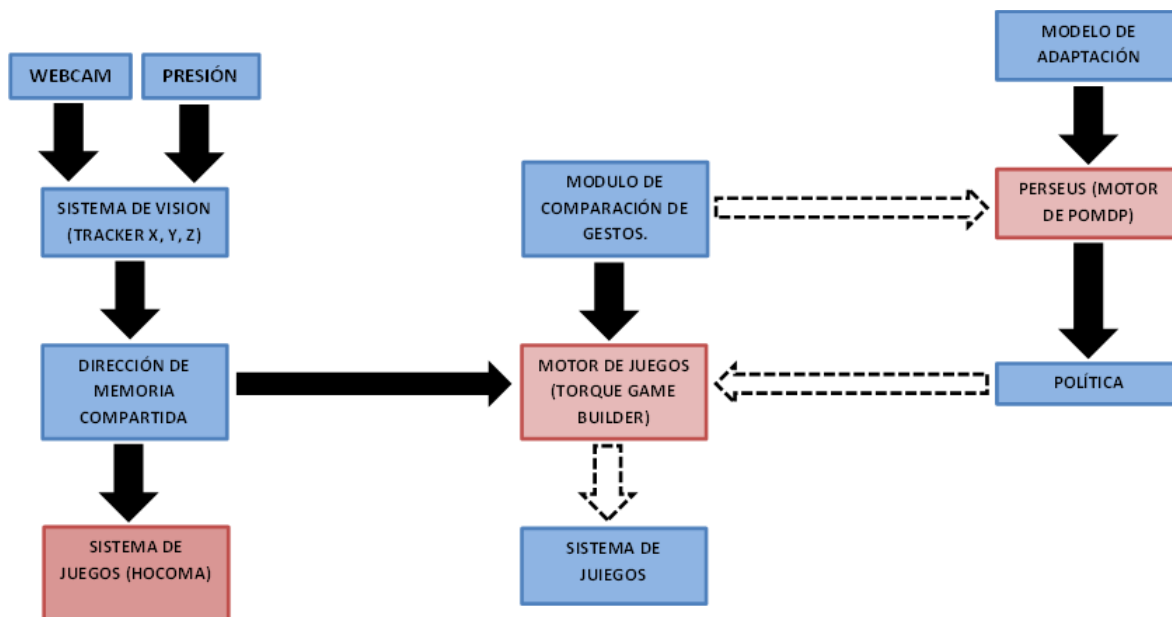


Figura 4.3 Arquitectura de Gesture Therapy, la cual se compone de los módulos: adaptación se encarga de manejar la dificultad de las actividades por medio de la Política, "Tracker" esta a cargo de enviar los datos del gripper como las coordenadas del desplazamiento así como los recabados por el sensor de presión, la memoria compartida es donde se van almacenando la información enviada por el "Tracker" que se van a emplear en los juegos de manera provisional, Perseus se ocupa de generar la política para los juegos, la Política es la parte central del módulo de adaptación, sistema de juegos de Torque los cuales se desarrollaron en el transcurso de este proyecto.

La implementación de estos módulos está distribuida en varias partes y construida sobre diferentes lenguajes. En la Figura 4.3, se muestra la interacción entre módulos y las herramientas con las que se desarrollaron. El sistema de visión desarrollado en C++ escribe sus salidas (posición del brazo y fuerza) en una dirección de memoria compartida. El entorno virtual hasta ahora usaba los juegos del sistema ARMeo de Hocoma, pero a partir de este trabajo, está desarrollado sobre el

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

motor de juegos Torque implementado C++. El motor de juegos se ha modificado para que lea desde la dirección de memoria compartida sobre la que escribe el sistema de visión. A través de una interfaz *JNI*, el entorno virtual comunica los valores de velocidad y precisión a la política de decisión generada por *Perseus*, el motor de procesos de *Decisión de Markov Parcialmente Observables (POMDP)* y núcleo del módulo de adaptación. Previamente entrenado, *Perseus* produjo una política de adaptación que ahora basadas en la observación del comportamiento del usuario, toma decisiones sobre el ajuste del nivel de dificultad de los datos. En un trabajo aledaño a esta tesis, la estudiante Shender Ávila Sansores [5] trabaja para hacer que esta política sea dinámica, en lugar de estática como lo es actualmente.

4.5. UN PAQUETE DE JUEGOS PARA LA TERAPIA DE GESTOS: ANÁLISIS DEL SISTEMA

Una vez seleccionado el motor de juegos que mejor se acomoda a nuestras necesidades, y conocida a grandes rasgos la arquitectura de la plataforma *Gesture Therapy*, podemos enfocarnos al desarrollo del paquete de juegos para *Gesture Therapy* como tal. Este paquete de juegos debe ajustarse a la taxonomía expuesta en el capítulo 2 para ajustarse a las necesidades de la población a la cual va dirigida.

4.5.1. Requerimientos del sistema.

El análisis de requisitos es la primera etapa marcada por la ingeniería del software en varios modelos de ciclo de vida del software. Durante el análisis de requisitos se determinan las necesidades y condiciones que debe cubrir el nuevo producto. Existen diferentes tipos de requisitos: del cliente, arquitectónicos, estructurales, funcionales, de comportamiento y de rendimiento, entre otros, pero no todos tienen por qué estar presentes. Esta sección detalla el análisis de requisitos para nuestro paquete de juegos.

4.5.1.1. Requisitos del cliente

Los requisitos del cliente recogen las restricciones del sistema desde el punto de vista operacional.

- **Bajo costo:** La plataforma *Gesture Therapy* está pensada para su uso en el hogar y enfocada a países de ingreso medio o bajo. El coste total de la plataforma, incluyendo elementos hardware y software debe ser mantenido dentro de los límites costeables de esta población objetivo. La versión de la plataforma anterior a esta tesis tenía un coste aproximado de 1000USD la unidad ya incluyendo el PC que es su componente más costosa. Añadir el paquete de juegos no debe alterar significativamente este coste.
- **Usable en un entorno casero:** La rehabilitación en el hogar debiera ir acompañada de una disminución de la necesidad de la presencia de personal especializado. Además reduce el coste tanto para el sistema de salud, como para el paciente reduciendo el número de desplazamientos hasta y desde el hospital. Finalmente, la rehabilitación en el hogar facilita la participación del entorno familiar en la administración de la terapia. La plataforma *Gesture Therapy* tiene como objetivo que pueda ser utilizado en el hogar. Añadir el paquete de juegos no debe impedir que el sistema sea usable en los hogares.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

4.5.1.2. *Requerimientos de hardware*

Los requerimientos de hardware describen las necesidades de la plataforma física que alojará al sistema.

- **Sistema operativo:** Los elementos existentes de la plataforma corren sobre *Windows XP, Vista* o 7 de 32 bits. Los nuevos juegos deben ser capaces de ejecutarse bajo este mismo entorno.
- **Cámara Web.** El sistema de visión actual es capaz de utilizar los modelos más comunes de cámaras web. La información de la posición del brazo es extraída en tiempo real de la secuencia de video por el sistema de visión, y escrita en una dirección de memoria compartida. Los juegos leen de esta dirección de memoria compartida pero el modelo de la cámara web utilizada les debe ser transparente.
- **Computadora (PC, laptop):** Las características mínimas requeridas del PC soporte de la plataforma son: *Procesador Dual Core 2.00 GHz.*, memoria RAM de 2Gb y disco duro de 320 Gb. En la actualidad un equipo con estas características es económico y fácil de adquirir. Los juegos deben poder ejecutarse sin retrasos en una máquina con estas características.
- **Dispositivo de entrada externo (*gripper o finger controller*).** Los datos de presión son extraídos en tiempo real por el sistema de visión, y escritos en una dirección de memoria compartida. Los juegos leen de esta dirección de memoria compartida pero el controlador utilizado les debe ser transparente.

4.5.1.3. *Requerimientos funcionales*

Los requisitos funcionales identifican las tareas y acciones necesarias que debe cumplir el sistema. Los requisitos funcionales describen las entradas y salidas del sistema, así como su comportamiento.

- **Entradas:** El sistema recibe como entradas las acciones de control por parte del usuario. Estas acciones de control corresponden con movimientos del brazo o bien con movimientos de flexión y extensión de los dedos sensados por un controlador con un sensor de fuerza incorporado. Estas entradas son codificadas a una secuencia digital y escritas en una dirección de memoria compartida por el sistema de visión ya existente. Además, el módulo de adaptación emitirá una decisión sobre el nivel de dificultad del juego cada cierto tiempo. Esta decisión debe ser recibida por los juegos, que deben actuar en consecuencia.
- **Salidas:** Una representación gráfica de un entorno virtual que responde a las acciones del usuario en tiempo real. La representación gráfica variará entre los diferentes escenarios o juegos, pero en todos los casos incorporará un avatar gráfico que represente el miembro en rehabilitación del paciente. Además de una representación gráfica actualizada del entorno virtual, entre las salidas del sistema también está la retroalimentación proporcionada.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

da a paciente y terapeuta. Esta información se presentará en pantalla, ya sea en tiempo real o al final del juego según corresponda a la naturaleza de la retroalimentación.

- **Comportamiento:** El entorno virtual debe responder a las acciones de entrada por parte del usuario en tiempo real. Para ello debe leer la dirección de memoria compartida por donde se comunican las entradas tan a menudo como sea necesario para garantizar un flujo adecuado del juego. Cada uno de los juegos tendrá una temática distinta y representará una actividad de la vida diaria distinta a fin de favorecer los diferentes movimientos de rehabilitación. Además los juegos deberán recoger datos del comportamiento del usuario tales como velocidad y precisión de los movimientos en tiempo real. Estos datos deben ser comunicados al módulo de adaptación para la toma de decisiones acerca del nivel de dificultad de la tarea.

4.5.1.4. Requisitos estructurales.

Los requisitos estructurales describen como debe comportarse el sistema. Se diferencia del comportamiento expresado en los requisitos funcionales en que no representan a la tarea central del sistema.

- **Confiabilidad:** En este contexto se entiende por confiabilidad, el hecho de que la plataforma de forma efectiva ayude a la recuperación motriz del paciente, y que bajo ninguna circunstancia pueda ser perjudicial para la terapia. Los juegos deben garantizar que al menos no se perderá destreza motriz existente como consecuencia de su uso. En este sentido, la plataforma debe ser beneficiosa o al menos neutral con respecto al aspecto psicológico. Los juegos deben contribuir a la motivación del paciente, y bajo ninguna circunstancia agudizar la depresión post-infarto si esta estuviese presente. La Tabla 4.2 resume algunos otros aspectos relacionados con la confiabilidad del sistema.
- **Usabilidad:** Los usuarios potenciales de los juegos son *el terapeuta* y *el paciente*. Es probable que estos usuarios no estén familiarizados con el manejo de un ordenador en general y de juegos serios en particular. Los juegos deben de proveer una interfaz sencilla e intuitiva sin que ello repercuta en su funcionalidad terapéutica.
- **Almacenamiento de información sobre el paciente:** La plataforma debe ser capaz de almacenar información referente a los pacientes, y a sus estadísticas de uso. Aunque esta parte aún no está disponible en la plataforma, los juegos deben de ser capaces de recoger información sobre el rendimiento del paciente y sus estadísticas de uso.
- **Adaptabilidad:** La adaptabilidad del sistema al rango de movimientos del paciente evita la frustración del paciente si se viese incapaz de realizar las tareas. La toma de decisión con respecto al nivel de dificultad del juego es responsabilidad del módulo de adaptabilidad. No obstante es responsabilidad de los juegos recoger los datos de rendimiento, léase velocidad del movimiento y precisión del mismo, y comunicar estos datos al módulo de adaptabilidad. Así mismo, también es responsabilidad de los juegos cumplir las acciones de ajuste del nivel de dificultad; incremento, decremento o mantenimiento del mismo, una vez recibida la instrucción por parte del módulo de adaptabilidad.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- **Cobertura de movimientos de rehabilitación:** Los juegos deben favorecer diferentes tipos de movimiento:
 - *Juegos de etapa 1:* Desplazamientos unidireccionales.
 - *Juegos de etapa 2:* Desplazamientos bidireccionales u omnidireccionales
 - *Juegos de etapa 3:* Realización de tareas funcionales.

Funcionalidad deseada	Funcionalidad no deseada
<ul style="list-style-type: none"> • Contenga un soporte adecuado para favorecer los movimientos, alterable según estado físico del paciente. La plataforma incorpora un soporte de agarre del controlador para aquellos pacientes con una discapacidad más severa. Los juegos deben monitorear el desempeño del paciente en tiempo real 	<ul style="list-style-type: none"> • Producir molestias físicas como dolor, daños en la piel como rozaduras, ampollas, etc.
<ul style="list-style-type: none"> • Que sea de utilidad en el tratamiento para que este sea lo más natural posible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inadecuada recuperación que resulte en patrones de movimiento indeseados.
<ul style="list-style-type: none"> • Favorecer el apego a la terapia mediante el aumento de la motivación. Los juegos deben proporcionar un entorno cambiante y de un nivel apropiado de dificultad para garantizar una alta motivación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Profundizar la severidad de la depresión post infarto.

Tabla 4.2 La confiabilidad es uno de los requisitos de comportamiento. El concepto de confiabilidad es amplio y tiene diferentes aspectos, algunos de estos son recogidos en esta tabla.

4.5.2. Diagramas de flujo de datos.

Un diagrama de flujo de datos es una representación gráfica del funcionamiento del sistema y de la transformación que sufren los datos desde su entrada al sistema hasta su salida del mismo. En el caso del paquete de juegos para *Gesture Therapy* la entrada de datos corresponde a las acciones de control del usuario; posición del brazo y presión de los dedos, y las acciones derivadas de la política de adaptación. En cuanto a su salida correspondería a la retroalimentación que se da al usuario. Nótese que esta retroalimentación incluye no sólo la información sobre el rendimiento del paciente, sino también a la posición del avatar gráfico o la representación gráfica de la consecuencia de una acción de control determinada, como por ejemplo el spray con cada presión de los dedos, en tiempo real. La Figura 4.4 muestra el diagrama de contexto recogiendo la interacción de los juegos con otros elementos de la plataforma de *Gesture Therapy*. Esta Figura recoge los almacenes de entrada y salida de los datos.

Los juegos desarrollados deben responder a las acciones del usuario con la correspondiente actualización de la representación gráfica tanto en términos (i) de la posición del avatar gráfico cómo (ii) de la representación de la acción de la presión, pero también (iii) monitoreando su rendimiento, y

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

(iv) ajustando los rangos de los objetivos en función de la acción de ajuste del nivel de dificultad. Estos cuatro subprocesos se recogen en el diagrama de nivel superior mostrado en la Figura 4.5.

Nivel 0: Diagrama de contexto

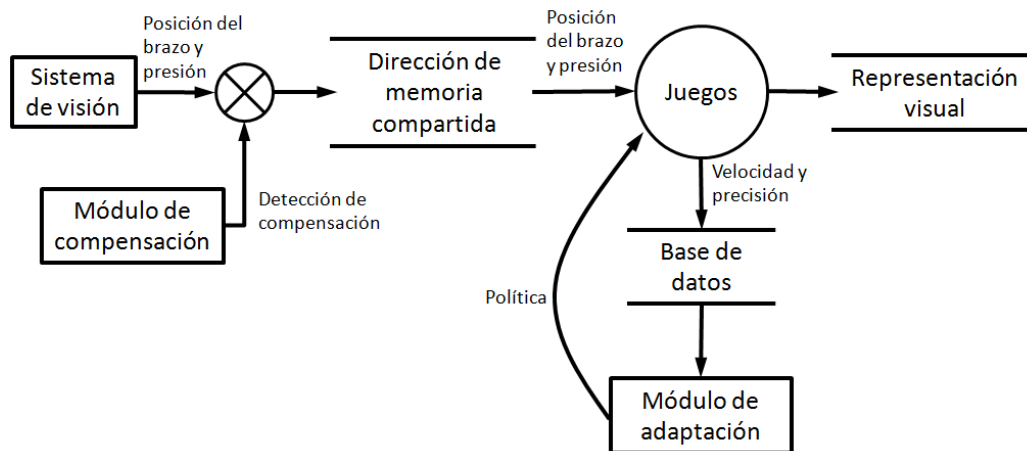


Figura 4.4 Diagrama de flujo de datos de nivel 0 o de contexto mostrando las interacciones del sistema (Juegos) con su entorno en la plataforma *Gesture Therapy*.

Nivel 1: Diagrama de nivel superior

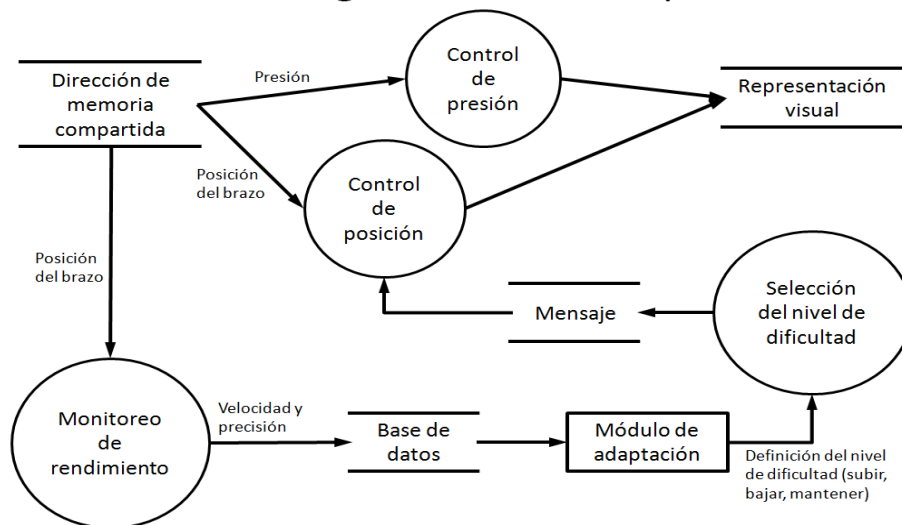


Figura 4.5 Diagrama de flujo de datos de nivel 1 o superior mostrando los procesos internos que describen al proceso principal. Los cuatro subprocesos aseguran que los juegos (i) mantienen una representación actualizada de la posición del brazo, (ii) responden en tiempo real a las acciones de presión de los dedos, (iii) monitorean el rendimiento del paciente y (iv) ajustan la distancia al objetivo de forma acorde al nivel de dificultad de los juegos.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

CONTROL DE PRESIÓN.

Aquí se reciben los datos proporcionados por el sensor de presión colocado en el mando del *gripper*. Esta información es empleada por el juego *Fly Killers*. Visualmente ayuda a que aparezca el humo del insecticida, además de activar el polígono de colisión el cual permite realizar una acción al momento de un contacto con el objetivo que en este caso sería un mosquito, cuando el mosquito colisione con el humo este se destruye.

CONTROL DE POSICIÓN.

Este subproceso se encarga de actualizar la posición en la escena del objeto que está siendo manipulado por el paciente. Lo realiza a través de la información proporcionada por el sistema de visión, el cual da las coordenadas x , y , y z ; las dos primeras coordenadas las utiliza el juego para interpretar la posición real de la extremidad y representarlas después en el juego. Esto se realiza de acuerdo al área de desplazamiento impuesta por la configuración del sistema de visión. Por otra parte también es el encargado de establecer la posición del objetivo a alcanzar, ya sea la carne en el caso del juego *Steak* o de la mancha por parte de *Clean Window*. Todo esto se ve reflejado en el escenario del juego.

MONITOREO DEL RENDIMIENTO.

Este subproceso realiza la valoración de como el paciente está realizando cada uno de los desplazamientos. Esto lo hace verificando: *la velocidad del movimiento*, analizando el tiempo que demora en llegar a su objetivo a partir del punto donde comienza el desplazamiento; *control*, califica la traza del desplazamiento. Todo esto al final del juego se promedia para después enviarlo al sistema de adaptación y analice si es necesario cambiar el nivel de dificultad.

SELECCIÓN DE NIVEL DE DIFICULTAD.

Este subproceso está encargado de adaptar el nivel de dificultad o carga de trabajo del juego de acuerdo a las capacidades del paciente. Lo realiza mediante la información que es enviada por el módulo de adaptación, el cual utiliza un modelo de *Procesos de Decisión de Markov Parcialmente Observables (POMDP)*, que indica al juego si baja, mantiene o sube el nivel de carga (dificultad) del juego. Por el momento cuando se varía de nivel, el subproceso de *control de posición* acerca o aleja el objetivo del objeto manipulado por el paciente haciendo que aumente o disminuya el rango de movimiento de la extremidad afectada. En trabajo más a futuro quizás se modifique esto para agregarle más cosas al juego, por ejemplo aumentar más objetivos a obtener en el caso de los tres juegos, o incrementar la velocidad de desplazamiento del mosquito sólo en el caso de *Fly Killers* (que se describe más adelante).

4.5.3. Diseño de la interfaz.

En cualquier sistema, uno de los objetivos al diseñar una interfaz es que esta sea transparente, es decir, intuitiva y que no deteriore el empleo del sistema sino que facilite el acceso a las capacida-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

des del mismo. En este caso, además hay que añadir la limitante de que de los tipos de usuarios; terapeuta y paciente, estos últimos además tienen una discapacidad física que limita su forma de interacción con el sistema. Teniendo en cuenta la población objetivo, se han reducido al máximo las opciones de configuración, y se ha favorecido el uso de imágenes sobre texto. El menú principal mostrado en la Figura 4.7, sólo muestra un fondo con una casa, metáfora de que las tareas a realizar son actividades cotidianas, y las tres opciones correspondientes a cada uno de los juegos están marcadas por imágenes referentes al contenido del juego. El acceso a los juegos es tan sencillo cómo dar un *click* de ratón sobre el juego deseado.

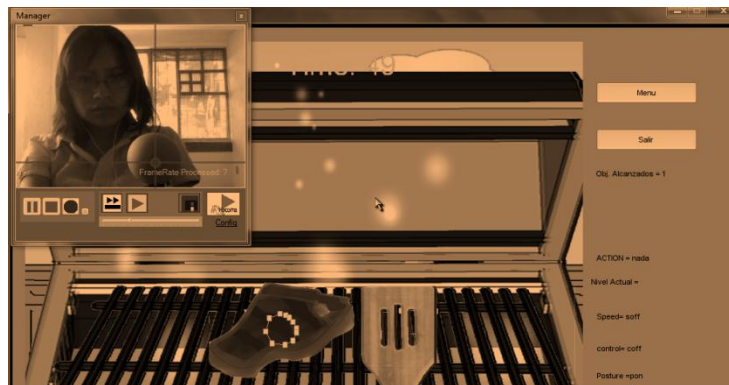


Figura 4.6 Interfaz del juego Steak.

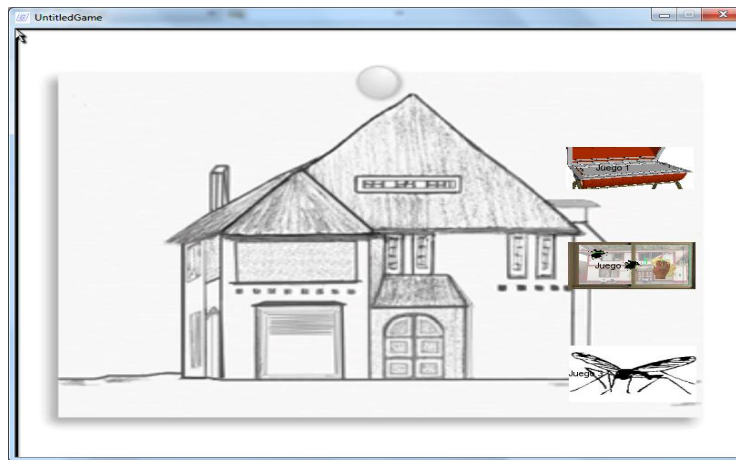


Figura 4.7 Menú principal del sistema. El menú principal es la pantalla que se muestra al inicializar el sistema y que permite el acceso al paquete de juegos. El menú favorece el uso de las imágenes sobre el texto lo que puede ser beneficioso para usuarios poco familiarizados con entornos informáticos. Además el uso de imágenes se espera que sea más universal que el uso de texto teniendo en cuenta que tenemos dos grupos de usuarios (terapeutas y pacientes) con una perspectiva muy diferente.

En los juegos también se procuró mantener reducido el número de opciones. De hecho cada uno de los juegos sólo dispone de dos botones, uno para volver al menú principal (marcado como Menú), y otro para abandonar la aplicación (marcado como salir) (Figura 4.6). Cualquiera de los dos

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

puede ser utilizado en cualquier momento. El desarrollo de los juegos es continuo en el sentido que desde que se entra al juego ya se está jugando al mismo; no hay una secuencia introductoria, ni un tutorial, etc., y además el juego es perenne, no hay que alcanzar una puntuación objetivo, o finalizar una acción. Pensamos que esta modalidad de juego continua favorece la jugabilidad además de reducir la complejidad de uso del sistema.

4.5.4. Funciones de comportamiento principales.

El control de los elementos del juego (objetos) en *Torque Game Builder* ocurre por medio de los comportamientos (*behaviours*). Los comportamientos permiten que un objeto inicie o responda a una acción por parte del usuario o a cualquier otro evento que ocurra durante la ejecución. Un objeto responde a uno o varios comportamientos. Tanto los objetos como sus comportamientos son reutilizables a través de los distintos juegos. En este sentido, los comportamientos son funciones estandarizadas disponibles para todos los juegos desarrollados. Por supuesto, la modificación de un comportamiento compartido por varios juegos, afecta a todos los juegos que hagan uso del mismo.

Los juegos desarrollados implementan tres comportamientos que son: *IAdaptation*, *IAdaptationController* y *IAdaptationGoal*.

- *IAdaptation* es el comportamiento responsable del monitoreo del rendimiento del paciente, y de la comunicación con el módulo de adaptación. A partir de los valores de las trazas (*IAdaptationGoal*) estima si la velocidad y precisión del movimiento son las adecuadas calificando ambas como *malas*, *normales* o *buenas*. Estas calificaciones de velocidad y precisión del movimiento son comunicados al módulo de adaptación (POMDP) y de este se obtiene la acción resultante de la política (subir, bajar o mantener el nivel de dificultad). La comunicación entre este comportamiento y el módulo de adaptación está implementada en C++ con llamadas al POMDP.
- *IAdaptationController* es el comportamiento responsable de procesar la información obtenida por el comportamiento *IAdaptation*. Este comportamiento se encarga de ejecutar la acción indicada por el POMDP. Se mantienen los siguientes niveles de dificultad; fácil, básico, intermedio y difícil. El nivel de dificultad en los juegos desarrollados se manifiesta a través del cambio en el rango de movimientos exigidos. Para ello, la colocación del objetivo se confina distancias según los niveles de dificultad, siendo mayores las distancias para los niveles más avanzados.
- *IAdaptationGoal* es el comportamiento responsable de capturar las trazas de cada desplazamiento realizado durante la ejecución del juego. Un desplazamiento comienza con la posición actual del avatar gráfico justo después de alcanzar un objetivo (o bien con una posición inicial la primera vez), y finaliza con el alcance del nuevo objetivo. En este periodo se estiman la velocidad del movimiento y la precisión del mismo. Este comportamiento detecta las colisiones entre el avatar gráfico y el objetivo y es responsable de la destrucción del objetivo alcanzado y de la generación del nuevo objetivo.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

4.5.5. Vistas e implementación.

La vista corresponde a la representación visual de la información. Una misma información admite ser presentada de distintas formas o vistas; por ejemplo, una serie de porcentajes podría ser representada como un diagrama de pastel o un diagrama de barras. Las vistas de un sistema son parte de la retroalimentación que se provee a terapeuta y paciente como usuarios del sistema.

Esta sección describe cada uno de los tres juegos desarrollados. Para cada uno de los juegos se comenta brevemente su objetivo y el tipo de movimiento de rehabilitación que pretende reentrenar en el paciente. Para cada juego se muestra una captura de pantalla (vista) del mismo.

4.5.5.1 Steak.

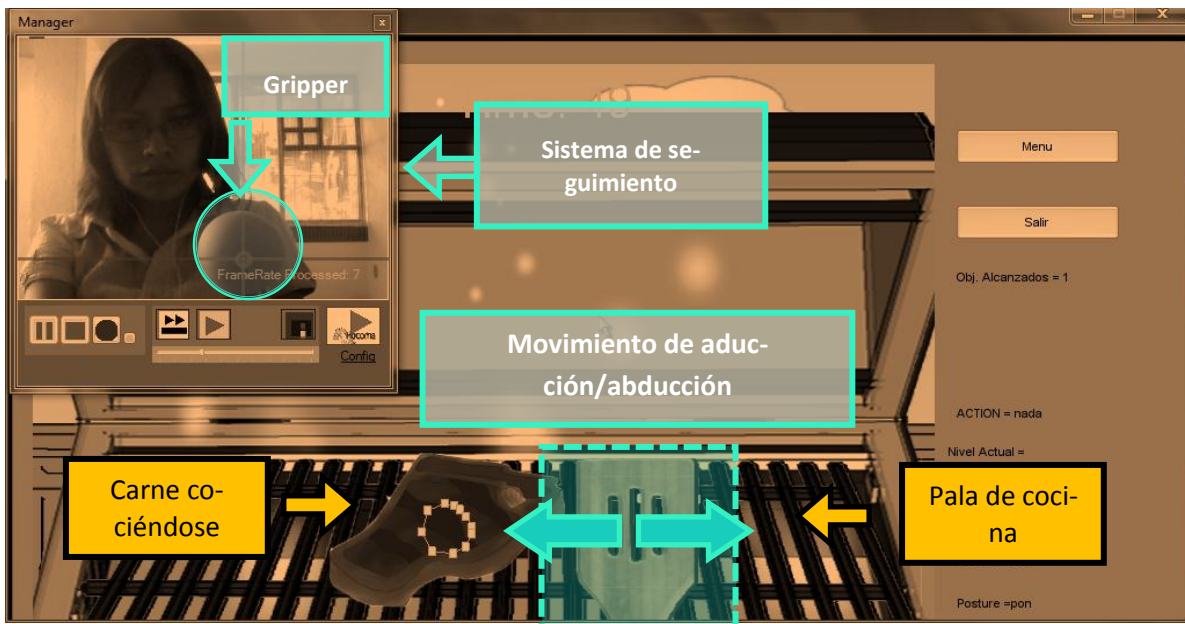


Figura 4.8 Captura de pantalla de uno de los juegos del paquete (juego "Steak"). Se han resaltado los objetos que intervienen en el juego y se señalan los movimientos que se deben realizar en esta actividad.

Este juego consiste en tocar un bistec (objetivo) colocado sobre una parrilla (Figura 4.8). El objetivo del juego es voltear (tocar) el bistec antes de que la carne se carbonice. El tiempo de carbonización de la carne es de 6 segundos. Al voltear el bistec, este desaparece, y aparece uno nuevo en una posición diferente (coordenada X) elegida al azar, pero a la misma altura de la pantalla (coordenada Y). El avatar gráfico que representa el movimiento del usuario es una pala de cocina. Para mejorar la inmersión se emplea una animación y sonido del fuego, así como la representación de la cocción paulatina de la carne. Este juego está pensado para reentrenar de forma unidireccional el movimiento de abducción/aducción del brazo, y por ende, está enfocado a la etapa más temprana de la terapia de rehabilitación. Nótese que aunque el juego está diseñado para fomentar un movimiento horizontal del brazo, el juego por se no restringe el movimiento vertical. La retroalimentación proporcionada en este juego es visual. Por un lado, la pala de cocina actualiza su locali-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

zación en tiempo real (conocimiento del rendimiento). Por otro lado, el número de objetivos alcanzados es mostrado en la parte derecha de la pantalla bajo los botones de vuelta al menú y salida del sistema (conocimiento del resultado). La evaluación de los movimientos, así como las acciones de la política de adaptabilidad son también resumidas en la parte derecha de la pantalla.

4.5.5.2 Clean Window.

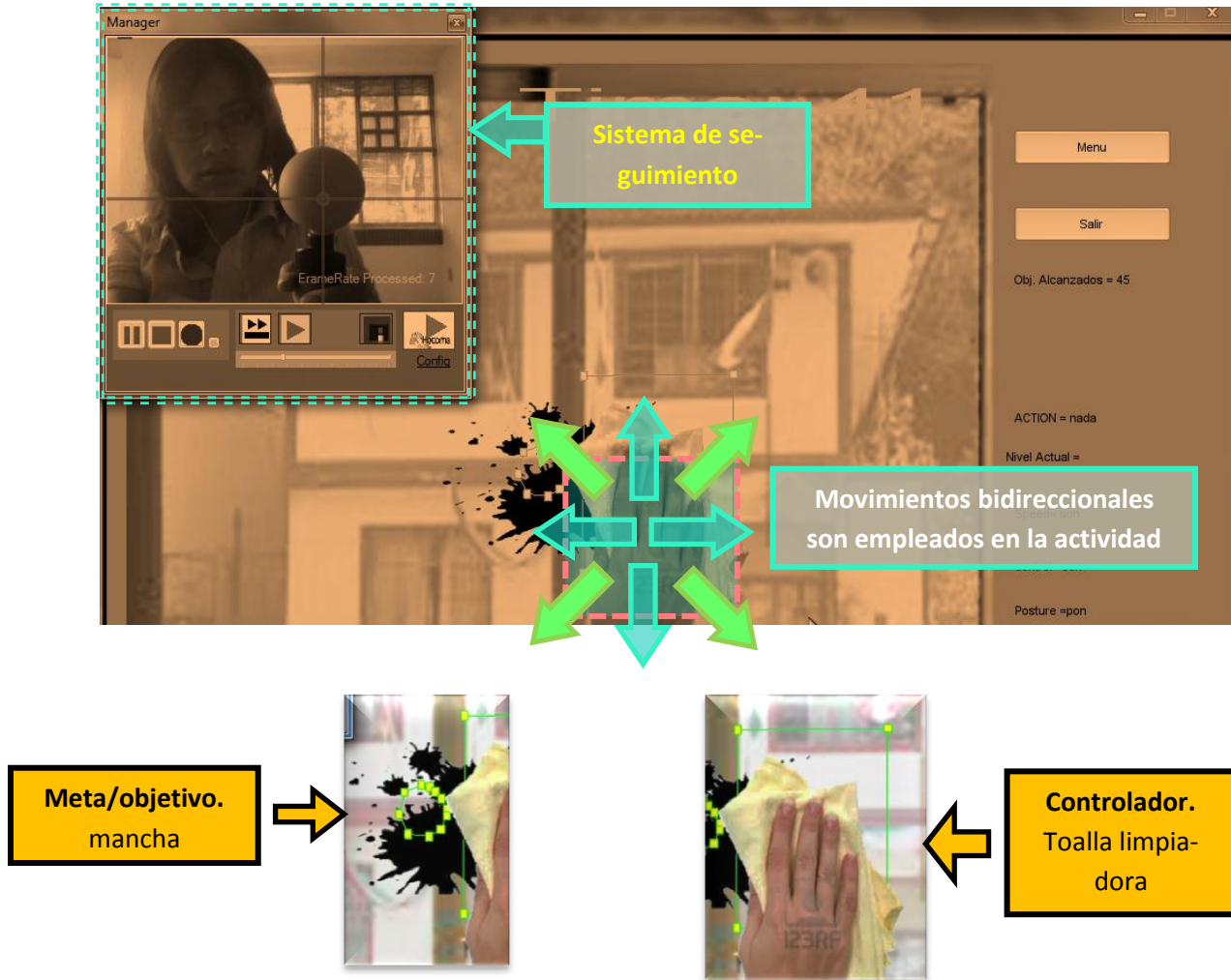


Figura 4.9Juego "Clean Window"; se muestra los movimientos bidireccionales que son requeridos en la actividad.

Este juego consiste en tocar una mancha (objetivo) sobre el cristal de una ventana (Figura 4.9). El objetivo del juego es limpiar (tocar) la mancha. Al limpiar la mancha, esta desaparece, y aparece una nueva en una posición diferente (coordenadas X e Y) elegida al azar. Tras un periodo de 6 segundos la mancha reaparece en otro lugar de la ventana aunque no se haya limpiado. El avatar gráfico que representa el movimiento del usuario es una mano agarrando un trapo de limpieza. Para mejorar la inmersión se reproduce una fotografía representativa de la vista a través de la ventana. Igualmente la mano con el trapo de limpieza es también una representación fotográfica. Este juego está pensado para reentrenar de forma bidireccional los movimientos de abduc-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

ción/aducción y elevación/depresión del brazo. En este sentido, está enfocado a una etapa intermedia de la terapia de rehabilitación. La retroalimentación proporcionada en este juego es visual. Por un lado, la mano con el paño de limpieza actualiza su localización en tiempo real (conocimiento del rendimiento). Por otro lado, el número de objetivos alcanzados es mostrado en la parte derecha de la pantalla bajo los botones de vuelta al menú y salir del sistema (conocimiento del resultado). La evaluación de los movimientos, así como las acciones de la política de adaptabilidad son también resumidas en la parte derecha de la pantalla (conocimiento del rendimiento).

4.5.5.3 Fly Killers

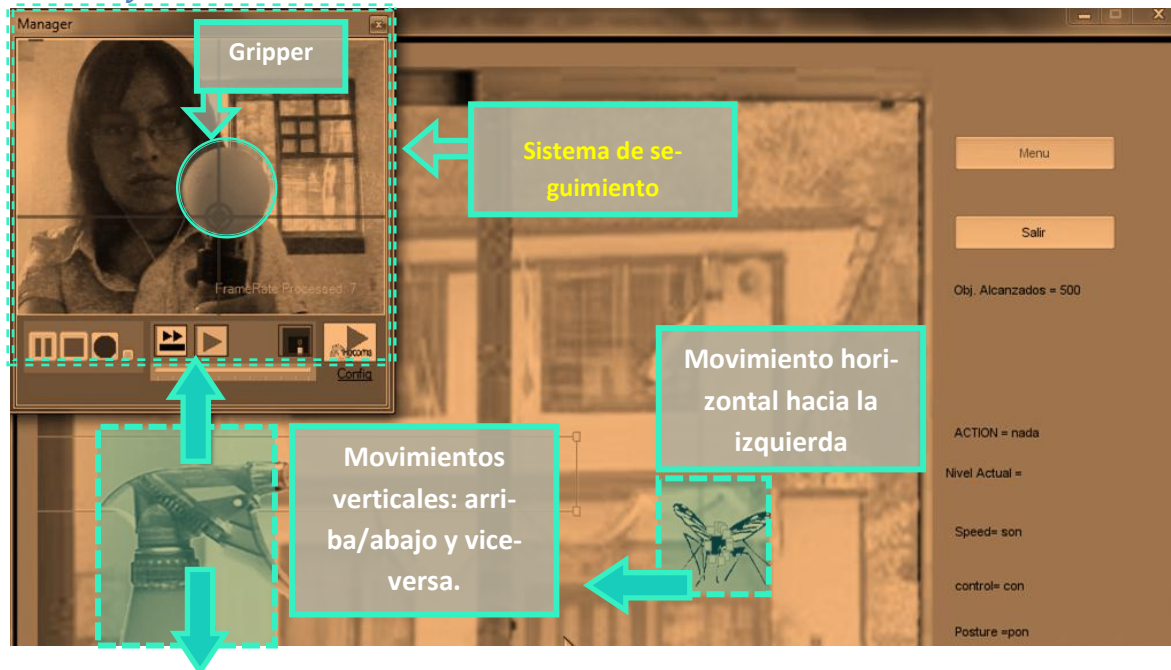


Figura 4.10 Juego "Fly Killers"; se muestra los movimientos realizados en la actividad, también cabe mencionar que se debe presionar el sensor contenido en el mango del gripper para que aparezca el humo el cual aniquila al insecto [73].

Este juego consiste en matar un mosquito (objetivo) que vuela a una cierta altura con un *spray* insecticida (Figura 4.10). El objetivo del juego es matar al mosquito rociándolo con el insecticida, colocándose a la altura del mosquito y flexionando (presionando) los dedos. Al matar el mosquito, este desaparece, y aparece uno nuevo en una altura diferente (coordenadas Y) elegida al azar a la derecha de la pantalla. La movilidad del bote de *spray* con respecto al eje X está limitada; imponiendo un máximo en términos de lo que se puede acercar el bote de *spray* al mosquito. Al aparecer el mosquito, empieza su vuelo horizontal hacia la parte izquierda de la pantalla con un tiempo de vuelo determinado. En la izquierda de la pantalla se encuentra el bote del insecticida cuya boquilla hay que alinear con la altura del mosquito. Si el mosquito no es eliminado antes de alcanzar la parte izquierda de la pantalla, este desaparece y aparece uno nuevo en la parte derecha. El avatar gráfico que representa el movimiento del usuario es una un bote de insecticida. Para mejorar la inmersión se incluye el *buzz* del mosquito al volar, y se recompensa la acción de flexión de los dedos con una rociada de *spray*. Este juego está pensado para reentrenar de forma unidireccional el movimiento de elevación/depresión del brazo (más difícil que el de aducción/abducción), así como

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

la flexión de los dedos de forma no fraccionada, es decir, no individualizada. Este juego está enfocado por tanto a una etapa intermedia de la terapia de rehabilitación. La retroalimentación proporcionada en este juego es visual. Por un lado, el bote de *spray* actualiza su localización en tiempo real y responde a los eventos de presión con una animación (conocimiento del rendimiento). Por otro lado, el número de objetivos alcanzados es mostrado en la parte derecha de la pantalla bajo los botones de vuelta al menú y salir del sistema (conocimiento del resultado). La evaluación de los movimientos, así como las acciones de la política de adaptabilidad son también resumidas en la parte derecha de la pantalla.

4.5.6. Limitaciones y fortalezas del sistema.

El paquete desarrollado en esta tesis consta de un conjunto de 3 juegos y un menú principal. Los juegos comparten la capacidad de informar de las coordenadas del movimiento (trazas), indicando el inicio y fin del movimiento una vez alcanza el objetivo, así como la posición del objetivo en cada momento de la ejecución. La construcción de una base de datos que recoja datos del perfil de usuario está en proceso, y un diseño inicial de la misma ya está disponible.

Los juegos desarrollados son para el reentrenamiento de movimientos unidireccionales o bidireccionales (no omnidireccionales). Por tanto, el movimiento a lo largo de las coordenadas X e Y es suficiente por ahora. En este sentido, la coordenada de profundidad Z aún no es necesaria. Los movimientos incorporados en los juegos son los siguientes: un primer juego con un movimiento unidireccional, un segundo juego de movimiento bidireccional, y un tercer juego de nuevo con un movimiento unidireccional pero incorporando el reentrenamiento de la flexión de los dedos. Con este planteamiento, los juegos desarrollados se pueden distribuir en las primeras etapas de la rehabilitación, quedando excluida por ahora las fases avanzadas de la rehabilitación donde se reentrenan movimientos funcionales.

El paquete de juegos desarrollados no tiene parámetros configurables. Aunque esto limita de alguna forma la variabilidad del juego a cambio, esto facilita su uso. Además no hay que olvidar que la propia plataforma a través de su configuración del sistema de visión y el módulo de adaptación, ya proveen a los juegos de una capacidad de ajuste del nivel de dificultad.

Los juegos emplean una combinación de gráficos modelados y fotografías. Esta combinación favorece el realismo de la escena a la vez que economiza en recursos computacionales. En cuestión de la interface quizás por su contenido es bastante intuitiva y fácil de operar. Esto es debido a que las actividades de los juegos son bastante sencillas de entender, por lo tanto no hay necesidad de que el paciente sea un jugador experimentado.

En cuestión de su implementación en el hogar es bastante accesible, ya que no hay necesidad de un espacio cuantioso como es el caso de algunos dispositivos robóticos porque lo único que necesita para su operación es una computadora personal, una cámara web ya sea de la misma máquina o una externa. Esto hace al sistema que tenga un bajo costo para su instalación.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

4.6. CONCLUSIONES.

El desarrollo de juegos ya sea lúdicos o serios es quizás uno de los desarrollos software más completos por su alto nivel de interacción con el usuario, la utilización masiva de diferentes canales de comunicación (visual y auditivas principalmente) y el requerimiento de respuesta en tiempo real. Debido a la complejidad de este proceso, existen aplicaciones especializadas en facilitar estos procesos conocidos como motores de juegos. Los diferentes motores se diferencian en el conjunto de rutinas que ponen a disposición del programador controlando diferentes aspectos de los juegos. La utilidad de un motor de juegos viene entonces determinada por las necesidades del juego bajo desarrollo. La primera parte de este capítulo, hizo un breve resumen de algunas de las características de los motores de juego que deben ser tomadas en cuenta a la hora de elegir un motor.

Posteriormente se dieron las razones por las cuales nos declinamos por el motor *Torque Game Builder*. La selección de *Torque* vino determinada por razones como el consumo de recursos, la capacidad de alterar el núcleo del motor, y la capacidad de satisfacer las necesidades de la interfaz entre otros.

El grueso del capítulo se centra en el desarrollo de los juegos. Se han presentado la especificación de requisitos, así como los diagramas de flujo de datos y los detalles del diseño de la interfaz. La descripción de los comportamientos de control de los objetos participantes en los juegos ha sido detallada. Finalmente se presentaron los distintos juegos, para los que sistemáticamente se describió la tarea a realizar, se indicó el movimiento de rehabilitación a reentrenar y la etapa de la terapia para la cual puede ser más apropiado el uso del juego, se comentaron aspectos considerados para la inmersión, y se expusieron las formas de retroalimentación. El capítulo cierra con una breve evaluación de las fortalezas y debilidades del sistema.

Y para poder observar los alcances de nuestro sistema es necesario realizar una serie de ensayos que proporcionen información y así poder verificar que tanto nuestros juegos están apegados a los criterios de diseños propuestos en nuestra taxonomía. Además de valorar si nuestra herramienta de evaluación es la correcta. Esto lo realizamos mediante una comparación de nuestro sistema en contra de un juego lúdico (*Pong*) y un sistema de juegos ya implementados en rehabilitación (*Egg Cracking, Hocoma*).

Capítulo 5 . Evaluación del apego de los juegos a los cri- terios de dise- ño.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

5.1. INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior se describió el paquete de juegos desarrollados en esta tesis. En este capítulo se evalúa el apego de estos a la taxonomía desarrollada en el Capítulo 3. Para evaluar dicho apego utilizaremos el cuestionario desarrollado como herramienta de evaluación en ese mismo capítulo. No obstante, el cuestionario debe ser validado de forma que queda confirmada su capacidad de discriminar juegos con fines de rehabilitación de otros juegos desarrollados con fines distintos. Este capítulo, además de la evaluación de los juegos desarrollados, presenta a la vez la validación del cuestionario.

A fin de realizar ambas tareas; (a) validación del cuestionario y (b) evaluación del apego de los juegos a los criterios incluidos en la taxonomía, se le pidió a una cohorte de sujetos sanos que jugaran a un paquete de 5 juegos. Este paquete incluye los tres juegos desarrollados (*Steak*, *Clean Windows*, *Fly Killers*), más otros dos juegos de control; uno desarrollado específicamente para la plataforma de rehabilitación *ARMeo* (*Egg cracking*), y otro juego de origen lúdico (*Pong*). Al final de cada juego, los usuarios respondieron el cuestionario. La diferenciación de estos dos últimos por parte del cuestionario, y en el caso de que en el cuestionario puntúe más alto el juego de *ARMeo*, corroborará la validez aparente (*face validity*) del cuestionario. Una vez demostrada la validez del cuestionario, este puede ser utilizado para evaluar el apego de los juegos a los criterios. Nuestros juegos demostrarán apego a los criterios de desarrollo de juegos si obtienen puntuaciones cercanas o superiores al juego de control de rehabilitación. De la misma forma, nuestros juegos demostrarán carecer del apego a los criterios de desarrollo de juegos si obtienen puntuaciones cercanas o inferiores al juego de control lúdico. La estructura del capítulo está dictada por la presentación de este experimento desde la presentación de sus objetivos y la metodología seguida hasta sus resultados.

Los cuestionarios recogen la apreciación de las capacidades y características de los juegos por los usuarios. La apreciación del usuario no necesariamente coincide con la intención del programador. En este sentido, el desarrollador de los juegos puede haber intentado incorporar una cierta característica a un juego, pero esta podría no ser apreciada por el usuario, por ejemplo, si la interfaz no es clara. Obviamente, el hecho de que un juego incorpore o no una característica objetiva, o subjetivamente a los ojos del programador, es irrelevante si esta no es apreciable por el usuario. Es más, hay algunas características que no son explícitamente programables, por ejemplo la percepción por parte del usuario de que el juego contribuye a su recuperación. De aquí la relevancia del cuestionario al evaluar el apego de los juegos a los criterios de desarrollo. El cuestionario no es un formulario que marca la incorporación de elementos objetivos, sino la evaluación subjetiva de los usuarios de que estos elementos están presentes en los juegos.

El capítulo se completa con la retroalimentación obtenida sobre los juegos por parte de un conjunto de expertos.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

5.2. METODOLOGÍA.

El experimento que a continuación se detalla se llevó a cabo en las instalaciones del *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)*. El experimento tiene una doble finalidad:

- I. Validar el cuestionario como herramienta de evaluación del apego de juegos a los criterios de desarrollo incluidos en la taxonomía. La hipótesis es que juegos desarrollados para rehabilitación deben puntuar más alto que otros juegos nacidos con otros fines.
- II. Evaluar el apego de los juegos desarrollados en esta tesis a los criterios de desarrollo incluidos en la taxonomía. La hipótesis es que nuestros juegos alcanzarán una puntuación similar o superior al juego de control desarrollado para rehabilitación.

5.2.1 Cohorte de Experimentación.

De entre la población del *INAOE* se reclutaron de 18 sujetos sanos. La Tabla 5.1 resume las características de esta cohorte. Todos ellos firmaron una hoja de consentimiento antes de participar en el experimento.

Id del sujeto.	Edad	Género	Uso de la mano.
1	32	Masculino.	Diestro.
2	No mencionó edad.	Masculino.	Diestro.
3	25	Masculino.	Diestro.
4	27	Femenino.	Diestro.
5	27	Masculino.	Diestro.
6	34	Masculino.	Diestro.
7	No mencionó edad.	Femenino.	Diestro.
8	22	Femenino.	Diestro.
9	No mencionó edad.	Femenino.	Diestro.
10	No mencionó edad.	Masculino.	Diestro.
11	No mencionó edad.	Femenino.	Diestro.
12	25	Masculino.	Diestro.
13	22	Masculino.	Diestro.
14	23	Masculino.	Diestro.
15	25	Masculino.	Diestro.
16	27	Masculino.	Zurdo.
17	29	Femenino.	Diestro.
18	29	Masculino.	Diestro.

Tabla 5.1 Características de los sujetos que participaron en el experimento.

5.2.1.1. ¿Por qué no evaluar a pacientes de infarto cerebral?

La población objetivo de la terapia de rehabilitación *Gesture Therapy* son pacientes de infarto cerebral que presenten una discapacidad motriz. No obstante para este experimento se ha reclutado una cohorte de pacientes sanos. Existen varios motivos para esta decisión:

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- Lo que se está evaluando es la validez del cuestionario y el apego de los juegos a unos criterios de desarrollo, no la validez terapéutica de los juegos. Los criterios de desarrollo como ya se ha indicado pretenden ser una condición necesaria pero no suficiente para garantizar la validez terapéutica de los juegos. De la misma forma en que un fármaco no se prueba directamente en los pacientes, sino en modelos animales, creemos que no sería conveniente probar los juegos directamente con pacientes. Si los juegos desarrollados carecen de validez terapéutica, la exposición de los pacientes a estos juegos puede perjudicar su rehabilitación. Sería necesario en ensayo clínico aparte para demostrar la validez terapéutica de los juegos.
- La participación de pacientes de infarto cerebral hubiese requerido de la presencia de un terapeuta durante la sesión de adquisición de datos.
- La participación de pacientes de infarto cerebral en este experimento encarecería el coste del mismo; ya sea para cubrir los desplazamientos de los participantes o bien para el transporte de la plataforma hasta el hospital. Desafortunadamente, no se cuenta con dichos recursos.
- Muchos de los elementos del cuestionario evalúan aspectos no relacionados con la discapacidad motriz, por ejemplo, contribuciones del canal de retroalimentación sonora, o la familiaridad con los juegos de computadora. En este sentido, no tenemos motivos para sospechar que las respuestas de un sujeto sano deben ser estadísticamente diferentes de las de un paciente de infarto cerebral.
- Finalmente, existe una limitante de tiempo impuesta por la duración natural de una tesis de licenciatura. Reclutar una cohorte de pacientes de infarto cerebral supone el desarrollo y aprobación de un protocolo clínico previo a la ejecución del experimento. La elaboración de dicho protocolo y su posterior evaluación por un comité de ética es un proceso largo que puede llevar varios meses. Además, el reclutado de sujetos sanos es intrínsecamente más rápido que el de pacientes con un diagnóstico determinado.

5.2.2. Transcurso de la sesión experimental.

El ensayo se llevó a cabo durante 3 semanas en el *Laboratorio de Robótica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*. Se citaron a 18 participantes. Las sesiones fueron de una duración aproximada de 1 hora, desde la llegada del participante al laboratorio hasta que este completase cuestionario correspondiente al quinto y último juego. Las actividades que realizaron fueron las siguientes:

- Al llegar al laboratorio, se les proporcionaba una hoja con la información acerca del experimento (Apéndice 4) para lectura del mismo. La hoja de información describe brevemente los objetivos e hipótesis del experimento, además de un breve resumen acerca del transcurso de una sesión del experimento. El participante podía tomarse el tiempo que necesitase para leer y entender esta hoja, y tenía la oportunidad de preguntar al investigador cualquier duda que tuviese al respecto.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- A continuación, se les proporcionó una hoja de consentimiento (Apéndice 5). Una vez estando de acuerdo el sujeto debe rellenar el documento y firmarlo antes de participar en el experimento.
- Una vez firmada la forma de consentimiento, los sujetos se disponían a jugar los 5 juegos en orden aleatorio. Cada juego tuvo una duración de 3 minutos.
- Tras cada juego se les proporcionaba el cuestionario de evaluación para calificar al juego.
- La sesión experimental terminaba con la finalización del último (quinto) cuestionario. El participante tenía la posibilidad de abandonar la sesión en cualquier momento.

5.3.3. Sistema de Evaluación.

Tipo de pregunta.	Dato.	Dato normalizado.		
Clasificación continua.	1 a 10.	No aplica la normalización.		
Likert.	No aplica, totalmente en desacuerdo, indiferente y totalmente de acuerdo.	No aplica.	0	
		Totalmente en desacuerdo.	3	
		Indiferente.	6	
		Totalmente de acuerdo.	10	
Diferencial semántico.	1 a 5.	1	0	
		2	4	
		3	6	
		4	8	
		5	10	
Stapel.	-5 a 5	-5	0	
		-4	1	
		-3	2	
		-2	3	
		-1	4	
		0	5	
		1	6	
		2	7	
		3	8	
		4	9	
Likert (preguntas del tipo 10.1.1).	Sí, no, no aplica	No aplica.	0	0
		No	0	5
		Sí	1	10

Tabla 5.2 Normalización empleada para cada tipo de métrica dentro de los valores del 0 al 10.

Antes del ensayo se estableció la relación entre cada pregunta y la categoría que se evaluaba con ella (Apéndice 3). Esto ofrece un panorama de cómo se valora cada una de estas clases de taxonomía propuesta.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

En la Tabla 5.2 se resume las distintas escalas empleadas, las cuales se normalizaron de 0 a 10. La normalización permite que todas las preguntas del cuestionario tengan el mismo peso sobre la puntuación final. El rango 0 a 10 es arbitrario pero facilita la adquisición de valores enteros.

Finalizado el experimento, se realizó la descarga de la información obtenida de las encuestas en una hoja de *Excel* para su análisis. Una vez cargado los datos, se procedió a la normalización de los datos acorde a la Tabla 5.2, asegurando que las diferentes preguntas contribuyen con el mismo peso para la puntuación final. Se obtuvo la media de cada juego por pregunta y por sujeto.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Incidencias en la experimentación.

En el transcurso de las sesiones una serie de inconvenientes, entorpecieron la ejecución. Como consecuencia tres sujetos fueron excluidos del análisis. Esta sección resumen las incidencias registradas durante el experimento. La naturaleza de las distintas incidencias significa que estas afectaron el desempeño del sistema y a la interacción entre el sujeto y los juegos.

Durante una de las sesiones el dispositivo de entrada (*gripper*) sufrió una avería. El desperfecto ocurrido fue la ruptura del sensor de presión. Con esta ruptura, los datos de presión no se enviaban al sistema de entrada de los juegos. En consecuencia, la interacción con los objetos dentro de la escena del juego se perdió completamente. Se trató de solucionar en la sesión afectada sustituyendo el controlador averiado con otro en funcionamiento. Desafortunadamente, la coloración de la esfera del segundo controlador disponible era distinta a la usada en la calibración, lo que complicó al sistema visión el seguimiento. El afectado fue el sujeto no. 9 que fue excluido del análisis. A partir de la sesión del sujeto 9 se utilizó el controlador de repuesto. Para reducir problemas de seguimiento, y que el color de la esfera no se confundiera con el fondo, la esfera de este controlador de repuesto se pintó de color fluorescente y se colocó un fondo negro.

Los sujetos 16 y 18 también fueron descartados porque cambiaron de brazo al momento de la ejecución del ensayo con ellos. En este caso se requería que los participantes utilizaran el mismo brazo durante todo el ejercicio. Aunque el sujeto 7 también cambio de brazo en un momento dado, rápidamente retorno al anterior de manera que a criterio del investigador no afectó al ensayo.

En la versión actual de *Gesture Therapy*, el seguimiento del controlador y por ende del brazo puede verse afectado por los cambios en la iluminación. Aunque las sesiones se llevaron a cabo dentro del laboratorio, y con luz artificial, se permitió la entrada de luz natural. El uso de luz natural permite una mayor intensidad lumínica, pero está sujeto a cambios de intensidad que afectan al seguimiento del brazo. Incluso los sujetos que realizaron las pruebas exclusivamente bajo la luz artificial no se vieron exentos de problemas con la iluminación debido al fallo de una de las lámparas del laboratorio.

Los sujetos 8 y 15 requirieron de una demostración para que pudieran observar el objetivo del juego *Egg Cracking*, mismo que tuvo una duración aproximada de 1 min.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

En un par de ocasiones hubo la necesidad de reiniciar los juegos *Egg Cracking* y *Clean Window*, por causas de configuración. Cada uno de ellos utilizaba distintas configuraciones en el eje X; el eje X que ocupa *Clean Window* se tenía que invertir con respecto del que utilizaba *Egg Cracking*.

Finalmente, en ocasiones el sonido era bastante bajo, y por lo tanto no era muy perceptible. Para solventar esta dificultad se remplazaron los altavoces por otros más potentes.

5.3.2. Resultados parciales por pregunta.

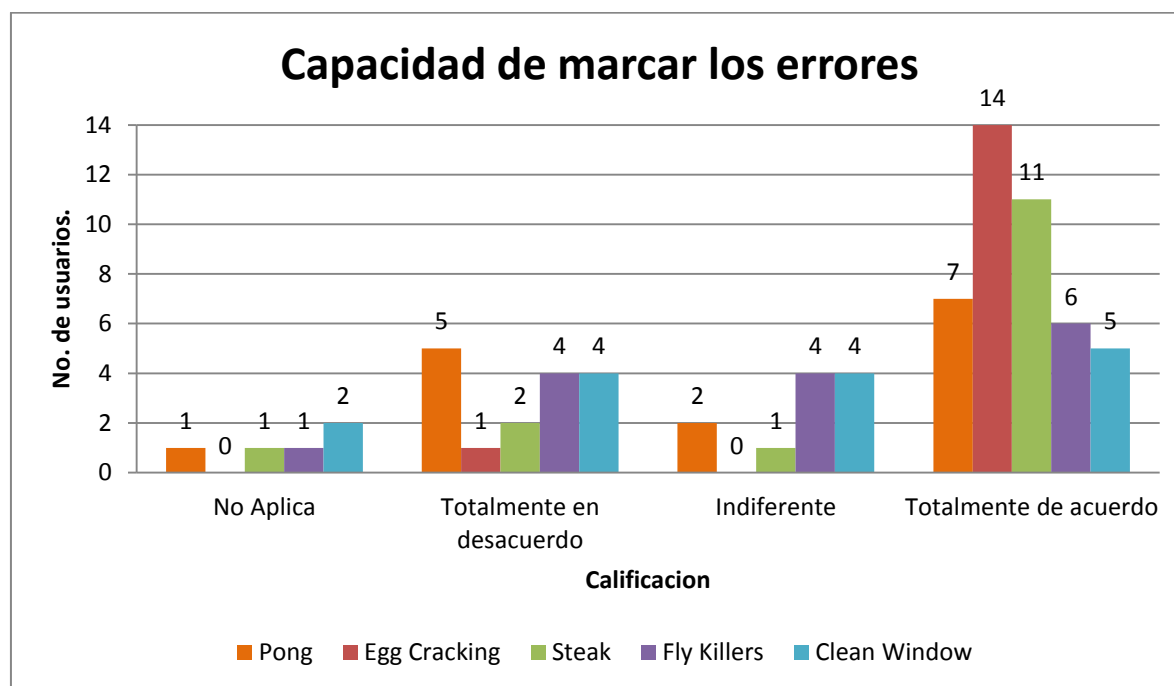
El cuestionario consta de 46 elementos que evalúan aspectos de los parámetros clínicos, la motivación, la repetición de movimientos y la significancia de las tareas. En esta sección repasamos algunos de los resultados más relevantes.

5.3.2.1. Parámetros clínicos.

SECCIÓN: Retroalimentación.

La retroalimentación proporcionada al usuario debe incorporar información acerca de la identificación de los errores cometidos por el usuario y la evaluación de la calidad del movimiento. La retroalimentación en los juegos puede ofrecerse a través de distintas vías sensoriales, en nuestro caso; visuales, sonoras o ambas. En realidad virtual, el canal visual es a menudo el más utilizado y de alguna forma la utilización de este canal se asume por defecto.

Indicación de errores

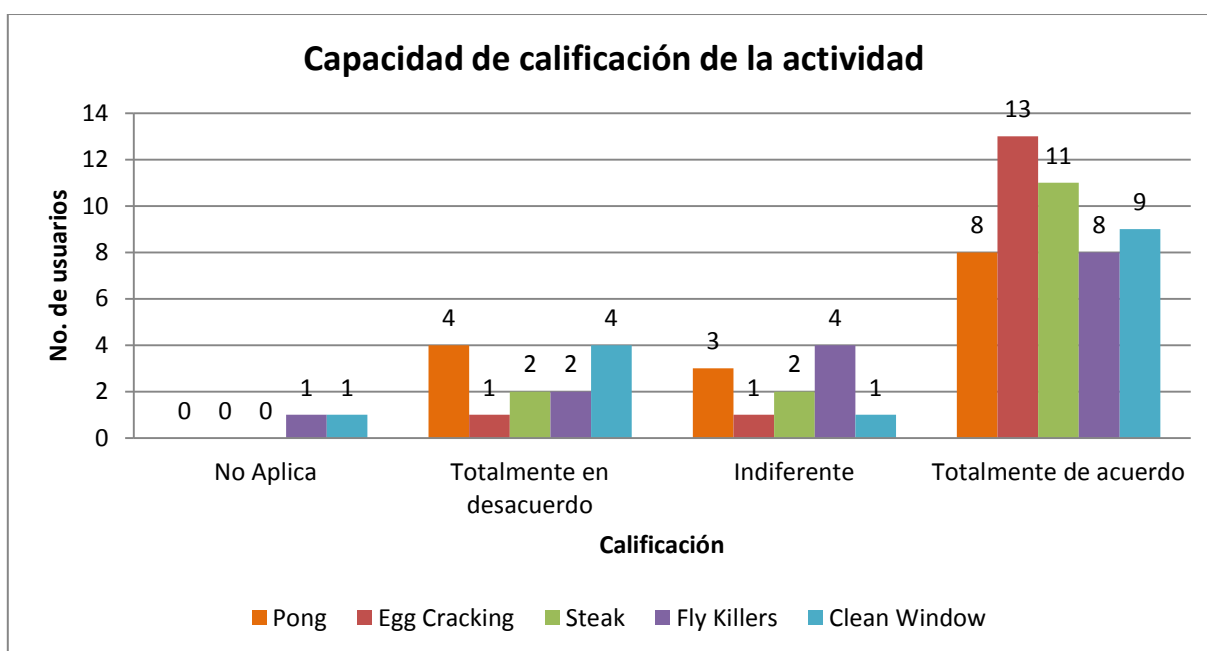


Gráfica 5.1 Capacidad de los juegos de proveer de una retroalimentación adecuada en términos de indicar los errores.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Acorde a las respuestas obtenidas, todos los juegos evaluados mostraron una cierta capacidad de marcar los errores de los usuarios como se muestra en la Gráfica 5.1. Esta capacidad no es uniforme entre los distintos juegos siendo *Egg Cracking* el juego con mayor capacidad de marcar los errores. En particular, 14 participantes apreciaron que *Egg cracking* avisaba de alguna forma cuando se cometía un error al momento de realizar la actividad y sólo 1 respondió que no lo hacía. La capacidad de *Pong* de marcar los errores a los usuarios es controversial; polarizando la opinión de los usuarios. La capacidad de informar sobre los errores por parte de los juegos desarrollados en esta tesis no es simétrica; mientras que *Steak* es evaluado positivamente por los usuarios en este rubro, la opinión es más moderada para *Fly Killers* y *Clean Windows*.

Calificación de la actividad.

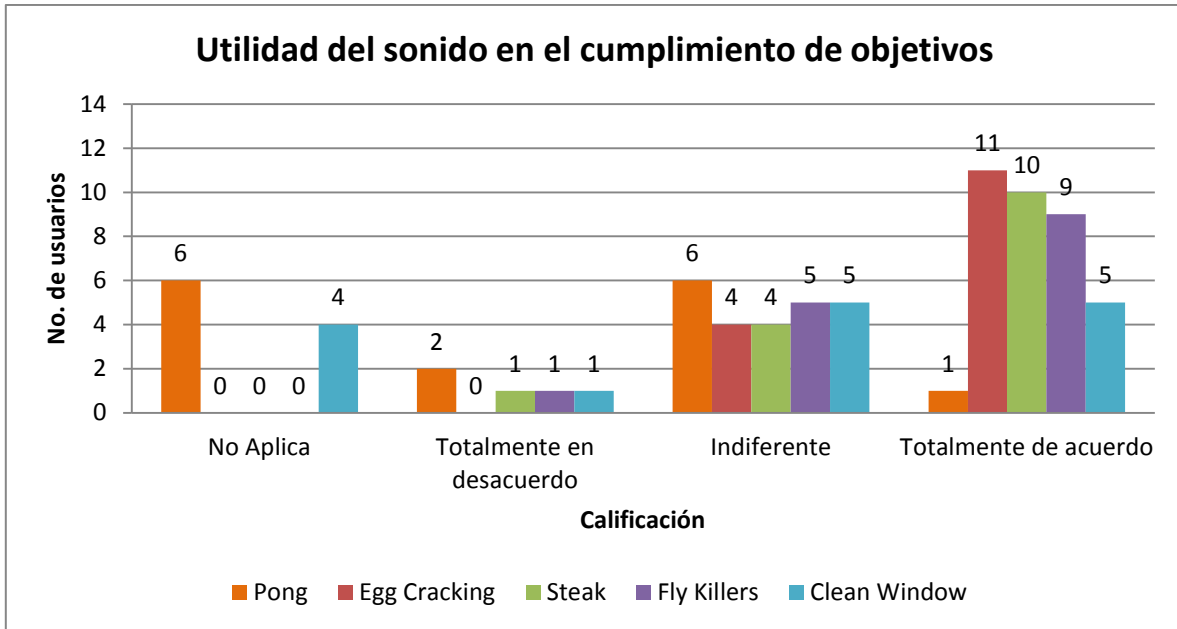


Gráfica 5.2 Capacidad de los juegos de proveer de una retroalimentación adecuada en términos de calificar la actividad. Es sorprendente que a pesar de la simetría objetiva con que esta capacidad está implementada en los juegos desarrollados en esta tesis, la apreciación de los usuarios de la misma difiera a través de los distintos juegos.

La calificación de la actividad se refiere por una parte a la indicación por parte de los juegos sobre si el sujeto ha llevado a cabo satisfactoriamente la tarea representada en el juego, y por otro, a una evaluación de la calidad de los movimientos con los que se ha llevado a cabo la tarea. La Gráfica 5.2 muestra que los juegos *Egg Cracking* y *Steak* son los que mejor indican correctamente la calificación de la tarea. La calificación de la tarea en los juegos desarrollados en esta tesis se resume al conteo de los objetivos alcanzados. A pesar de esta simetría, no todos nuestros juegos son apreciados de la misma forma por los usuarios, siendo *Steak* el mejor valorado, y *Clean Window* el más desfavorecido. *Egg Cracking* por su parte, es el único juego que además de contar los objetivos conseguidos, cuenta con la capacidad de calificar la elaboración de toda la actividad; para ello

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

al finalizar el juego, se presenta una pantalla indicando que tan bien se realizó la actividad. Quizás sea esta capacidad la que le hace destacarse en este aspecto.



Gráfica 5.3 Utilidad de los efectos sonoros para llevar a cabo las tareas y objetivos de los juegos. En los juegos en los que hay presencia de efectos sonoros (Egg Cracking, Steak, y Fly Killers) estos son por lo general bien recibidos. La presencia de respuestas favorables en aquellos juegos carentes de efectos sonoros puede ser indicativa de una ambigüedad en la formulación de la pregunta.

Sonidos del juego.

En un juego, los efectos de sonidos son útiles para capturar la atención del sujeto así como para favorecer la inmersión. Además, el uso del sonido puede ser utilizado como canal de retroalimentación, por ejemplo, emitiendo un *beep* tras un error del usuario. El uso apropiado del sonido es una herramienta importante en las manos del programador. No obstante, su abuso también puede ser contraproducente. En este sentido, y como se indicará más adelante en la evaluación que los expertos hicieron de nuestros juegos, en el caso del juego *Fly Killers* uno de los expertos consideró molesto el sonido del mosquito.

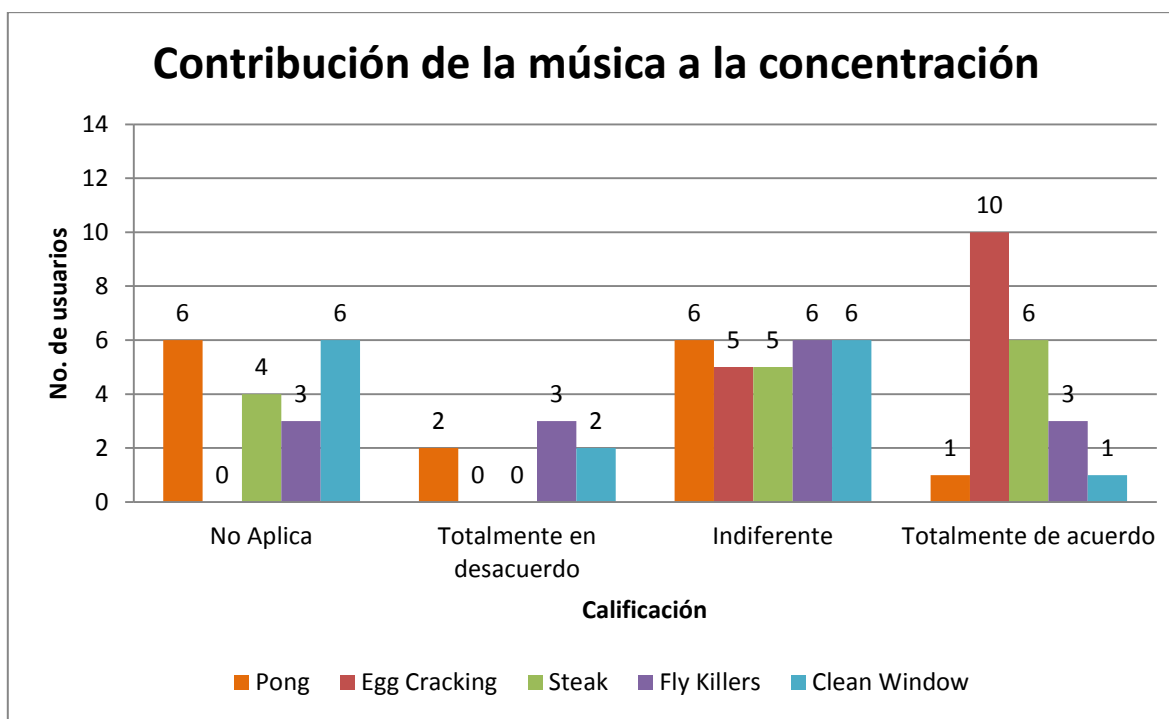
Esta pregunta se ve afectada por la presencia o ausencia de sonidos en el juego. Pero en general la influencia de los sonidos en aquellos juegos que los incorporaban (*Egg Cracking*, *Steak* y *Fly Killers*) a la hora de realizar las tareas fue evaluada positivamente como muestra la Gráfica 5.3. De estos, el uso de sonidos en el juego *Fly Killers* es apreciado como el que menos ayudaba a cumplir con el objetivo del juego. No en vano, algunos participantes manifestaron, que si bien el zumbido del mosquito contribuía al realismo del juego, pero con el paso del tiempo les resultaba molesto. Los juegos *Pong* y *Clean Window* no incorporaban sonidos y por tanto las respuestas en el tono de no aplica o indiferente. Pero en este sentido es llamativo que un reducido número de participantes,

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

consideraran que el sonido (inexistente) en estos juegos les ayudaba a realizar sus tareas. Es posible que esto denote una ambigüedad en lo referente a la formulación de la pregunta.

Música del juego.

La presencia de la música ambiental en el juego puede ser beneficiosa si contribuye a la concentración del usuario en la tarea o si simplemente hace más amena la ejecución de la misma. No obstante la presencia de la música puede ser contraproducente si distrae al usuario de la tarea, o si por su estridencia y/o repetitividad llega a ser molesta.



Gráfica 5.4 Contribución de la música ambiental del juego a la concentración. El único juego que incorpora música recibe una buena aceptación por parte de los usuarios. De nuevo, al igual que con los efectos sonoros, respuestas positivas en aquellos juegos que no incorporan música puede delatar la ambigüedad en la formulación de la pregunta.

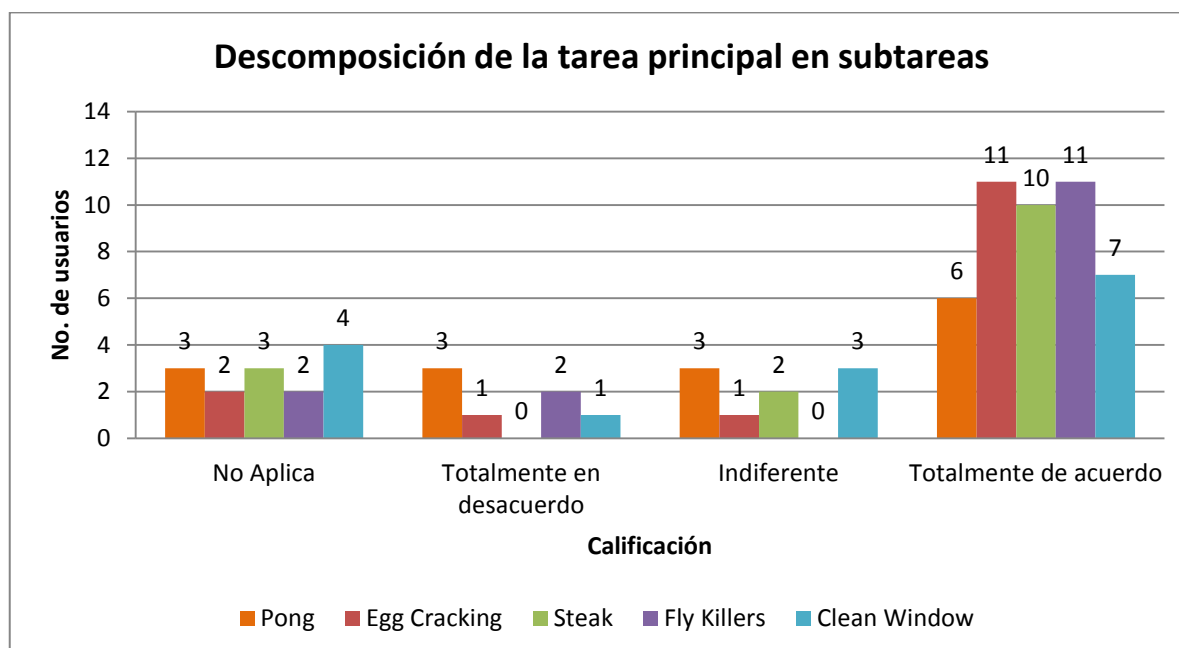
De los juegos que formaron parte del experimento sólo *Egg Cracking* tiene acompañamiento musical. En la Gráfica 5.4 se puede observar que cuando la música está presente, caso de *Egg Cracking*, esta es recibida favorablemente por los usuarios (66.6% a favor). Incluso las respuestas más templadas indicaron indiferencia, sin que ningún participante fuese contrario a la afirmación de que la música ayuda a la concentración. No obstante, este resultado hay que tomarla con cautela ya que no hay más juegos con música ambiental en el paquete y además de nuevo la presencia de respuestas favorables en aquellos juegos carentes de acompañamiento musical hace pensar que la pregunta puede estar formulada de manera ambigua. Es particularmente llamativo el caso de *Steak*, que a pesar de no incorporar música recibió en la respuesta favorable el mayor número de observaciones, quizás de nuevo denotando una formulación ambigua de la pregunta.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

SECCIÓN: Tareas.

Realización de tareas complejas.

Las tareas funcionales suelen ser tareas complejas que puede por lo general descomponerse en tareas más sencillas, de forma que cada subtarea puede ser reentrenada de forma independiente. Los juegos orientados a las primeras etapas de la rehabilitación por lo general incorporan tareas más sencillas donde la partición en tareas más elementales no es tan obvia. El cuestionario pretende evaluar el beneficio de la descomposición de tareas complejas en subtareas más elementales. En el paquete de juegos analizado en este experimento, *Pong* con un único movimiento unidireccional (*elevación/depresión*) y *Steak* con un único movimiento unidireccional (*aducción/abducción*) no requieren de una descomposición en subtareas. Los juegos *Egg Cracking* y *Fly Killers* incorporan tareas lo suficientemente complejas como para poder ser entendidas como la suma de subtareas, por ejemplo, el movimiento del brazo para alcanzar el objetivo y la flexión de los dedos para completar la tarea. Juegos como *Clean Window* demandan un movimiento bidireccional, y su partición en subtareas de movimientos unidireccionales es más sutil.



Gráfica 5.5 Pocos de los sujetos concordaron que en Pong se realiza una actividad que se requiera de varios pasos para completar la actividad.

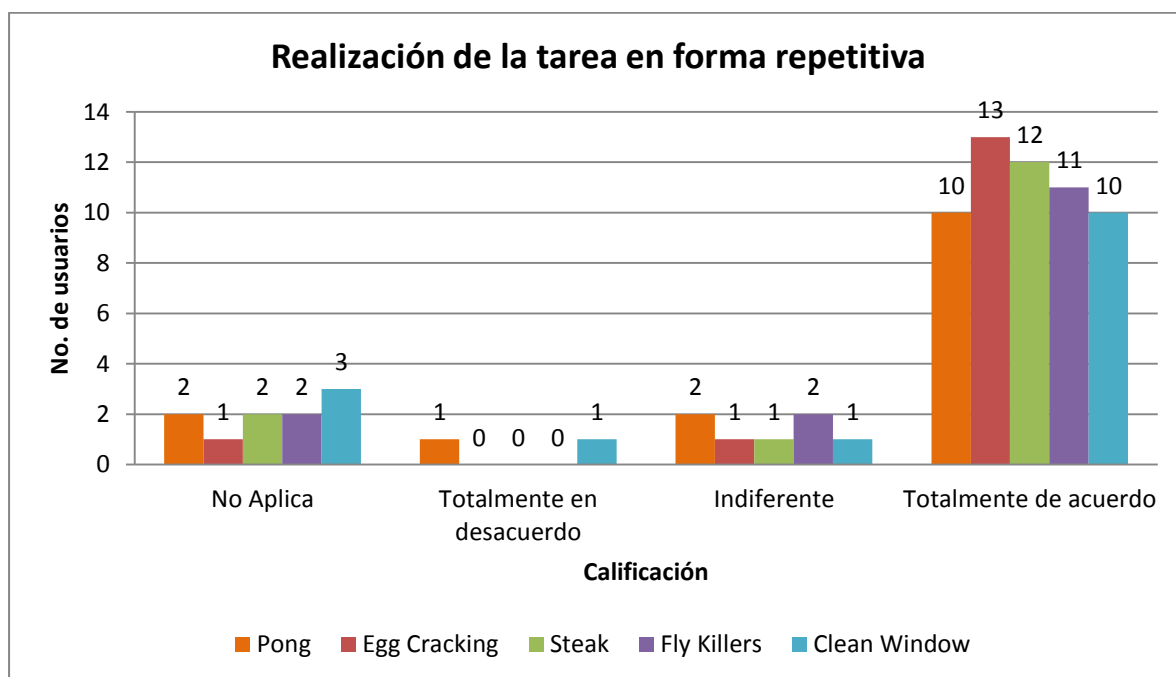
En ninguno de los casos la división de la tarea en subtareas es explícita, ni los juegos enfatizan dicha división, y durante el experimento no se informa al usuario de la posible subdivisión. Con estos precedentes, los resultados recogidos en la Gráfica 5.5, sugieren que la apreciación de las subtareas puede ser natural, y los usuarios mostrarían aprecio por las subtareas incluso cuando estas son implícitas. En este sentido, no es sorprendente que los juegos con tareas más complejas, obtengan la apreciación más alta en la calificación de la necesidad de particionar en subtareas para completar una actividad. Más difícil de explicar es la diferencia obtenida entre *Pong* y *Steak*.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

A pesar de que ambos juegos únicamente demandan un movimiento unidireccional, las respuestas sugieren que los usuarios aprecian una descomposición en tareas para *Steak*, mientras que no así para *Pong*. Este resultado es significativo puesto que pondría de manifiesto que en entorno de simulación influye en la percepción de las tareas. Por ejemplo, un entorno más familiar como es asar una carne en una parrilla es automáticamente entendido como una tarea compleja que requiere de subtareas, mientras que en un entorno más indiferente como el de *Pong*, la tarea real (movimiento unidireccional) es más apreciada como tal obviando la necesidad de subtareas.

Repetición de actividades.

Una de los pilares de una terapia de rehabilitación, es que las acciones deben ser ejecutadas de forma repetida para que el movimiento pueda ser reentrenado [79, 34]. Aunque los juegos pretenden camuflar esta actividad repetitiva para hacerla más soportable, el elemento repetitivo es clave. Todos los juegos para rehabilitación deben incorporar un elemento de repetición motriz, pero la diferente dosis e intensidad, así como el ambiente del juego pueden distorsionar la percepción del mismo. La pregunta del cuestionario está enfocada a evaluar precisamente la percepción de este elemento repetitivo y su contribución a la recuperación motriz. Esta pregunta está íntimamente relacionada con el bloque de repetición de movimientos que se repasa más abajo.



Gráfica 5.6 Todos los juegos presentan una componente de repetición de movimientos con diferencias en la dosis e intensidad de las mismas haciendo que estas no sean percibidas de la misma forma para los sujetos.

Como era esperable, la Gráfica 5.6 manifiesta que entre el 66.6 % y el 86.6% según el juego coincidieron en que las actividades contenidas en los juegos son tareas repetitivas y que tienen una influencia positiva en la rehabilitación. Este resultado contundente no sólo confirma el apego de los

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

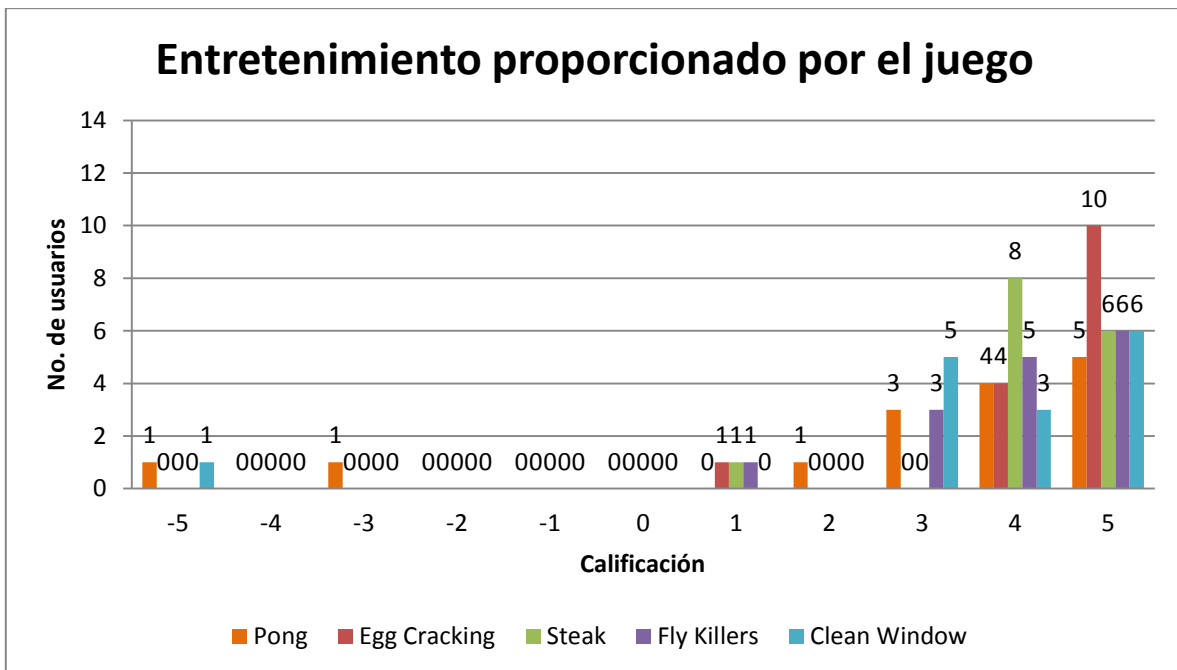
juegos a los criterios de diseño, sino directamente a los pilares de la rehabilitación. De forma interesante, incluso *Pong* demanda una tarea repetitiva, lo que confirma que al menos es viable la adaptación de juegos lúdicos para cumplir con ciertas necesidades de una terapia de rehabilitación. Nótese que esto no implica que el juego tenga validez terapéutica, sino sólo el potencial del mismo.

5.3.2.2. Motivación

De todas las posibles ventajas que puede ofrecer una terapia basada en realidad virtual sobre otras terapias más tradicionales, la motivación extra suscitada suele ser la más reclamada. La motivación de un sujeto para realizar una tarea es frecuentemente cuantificada con el índice de motivación intrínseca. En este caso, no queremos cuantificar la motivación como tal, sino la capacidad de los juegos de despertar dicha motivación. A diferencia del índice de motivación intrínseca que mide la motivación despertada por una tarea ya realizada, la capacidad de despertar motivación es una mezcla de la experiencia recién realizada y de las posibilidades que ofrece a futuro. Para ello medimos diferentes aspectos tales como el entretenimiento que despiertan los distintos juegos, el compromiso o posible cumplimiento con una terapia de estar compuesta por ejercicios en los juegos, o la tolerancia de los usuarios al sistema.

Interés

Entretenimiento ofrecido.

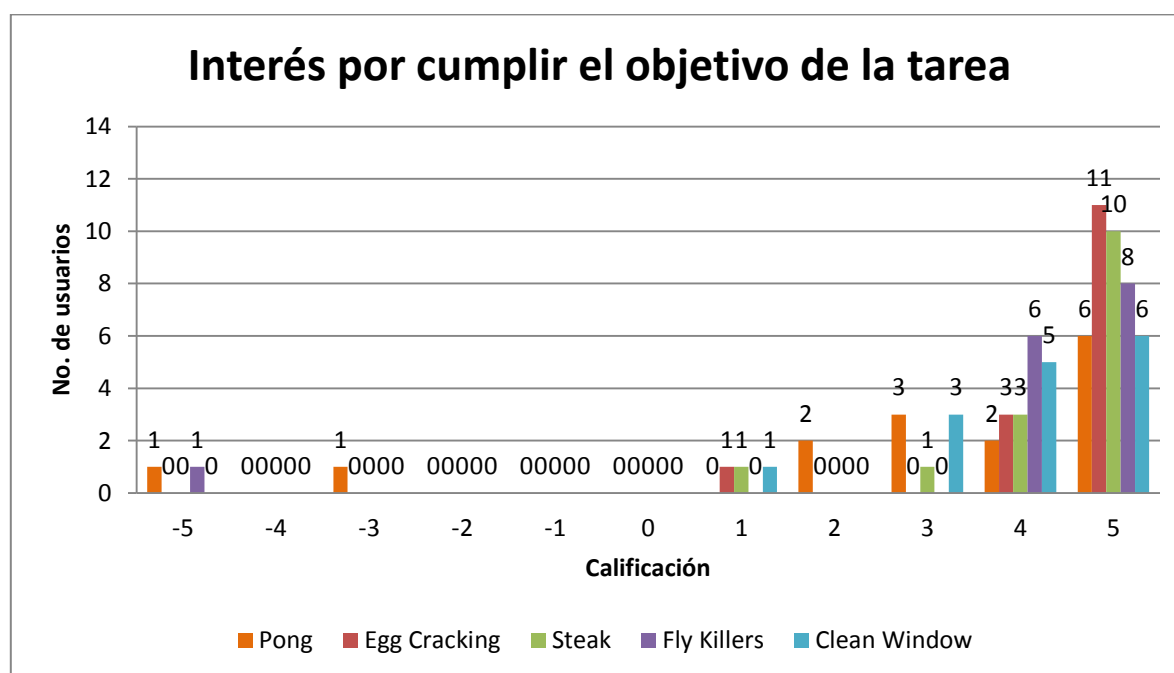


Gráfica 5.7 Entretenimiento proporcionado por los juegos. En general, todos los juegos son calificados favorablemente con la mayor parte de las observaciones en el extremo positivo de la calificación. Sorprendentemente el juego lúdico obtiene baja puntuación en comparación a los de rehabilitación.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Las obligaciones de un juego serio de anteponer las necesidades de la rehabilitación al entretenimiento podría ser una limitante para despertar la motivación de los usuarios. Sorprendentemente, los resultados de nuestro experimento sugieren una situación diferente. No sólo los juegos especializados para rehabilitación fueron calificados como muy entretenidos, sino que incluso superaron al único juego de origen lúdico, el *Pong* como se ilustra en la Gráfica 5.7. No tenemos una hipótesis sobre por qué ocurre esto. Quizás la temática del *Pong* se aprecia como monótona, quizás la población reclutada se identifica más con las tareas diarias de los juegos de rehabilitación, o quizás los gráficos más vistosos de los juegos de rehabilitación están contribuyendo a esta situación. En cualquier caso, este resultado pone de manifiesto que el entretenimiento no está reñido con las obligaciones de la terapia, lo que a fin de cuentas es parte de la motivación añadida que se le supone a las terapias basadas en realidad virtual.

Interés por cumplir con la tarea.



Gráfica 5.8 Capacidad de los juegos de fomentar un interés cumplir con la tarea de rehabilitación. Los juegos de rehabilitación muestran una mayor capacidad en captar la atención del sujeto en comparación del juego lúdico, para el que la cola de observaciones se estira más a la zona templada de la puntuación.

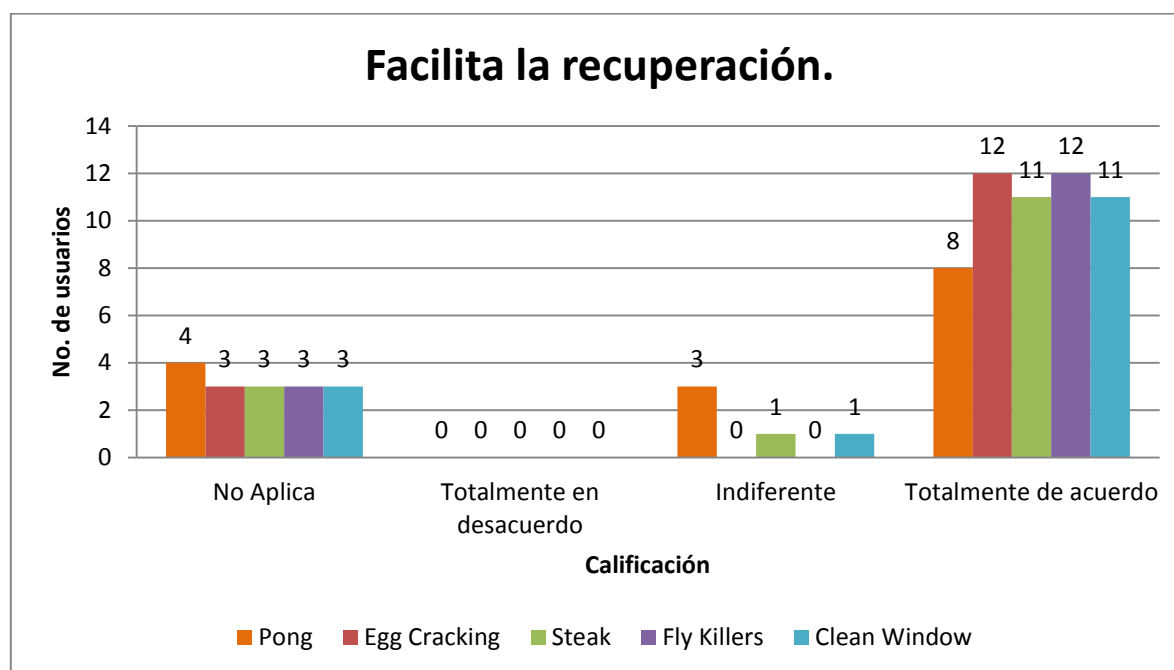
Otra cara de la misma moneda referente al entretenimiento suscitado entre los usuarios es el interés por cumplir con la tarea asignada. Los juegos de rehabilitación deben ser atractivos para retener la atención del usuario, y consecuentemente favorecer el cumplimiento con los ejercicios de la terapia de rehabilitación codificada en el objetivo del juego. En consonancia con el entretenimiento suscitado, la mayor parte de las respuestas de los participantes fueron positivas. Pero a diferencia del entretenimiento suscitado, la cola de la distribución del histograma de respuestas para el *Pong* se escora claramente a la zona templada de respuestas (Gráfica 5.8). Esta observación es

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

crítica ya que pone de manifiesto la capacidad del cuestionario de discriminar los juegos de rehabilitación de aquellos de origen lúdico. En particular, para la calificación más alta entre *Pong* y *Egg Cracking* existe una diferencia del 33.3%. Por parte de los juegos desarrollados en este trabajo el que puntualizó mejor fue *Steak* con un 66.6% de interés por terminar la actividad en la puntuación más alta. Esto puede ser debido a que *Steak* contaba con una mejor retroalimentación en comparación a los otros juegos creados por nosotros.

Facilita la recuperación.

Un aspecto importante de la motivación es que el paciente comprenda que la rehabilitación depende de él, y que él tiene la capacidad de mejorar su pronóstico [14]. Solo si el sujeto experimenta una sensación de mejora seguirá motivado a continuar con el tratamiento. La percepción por parte de los usuarios de si un juego facilita o no la recuperación no es una característica que se pueda programar de forma explícita, y precisamente por esto, lograr dicha percepción no es trivial. Por supuesto, la percepción subjetiva de la mejora no necesariamente va de la mano con la conductual (medibles con escalas como Fugl-Meyer) pero ambos son componentes necesarios para la rehabilitación.



Gráfica 5.9 Evaluación de la contribución de la actividad a la recuperación motriz. La percepción subjetiva de mejora contribuye a la motivación a continuar con la terapia. Los juegos que incorporan una actividad funcional obtienen un puntaje más alto que el juego lúdico. Esta observación refuerza la creencia de que una tarea significativa proporciona excelentes beneficios para la rehabilitación, en este caso gracias a la componente motivacional.

La Gráfica 5.9 sugiere que los juegos orientados a rehabilitación son apreciados como más apropiados para favorecer la recuperación que aquellos no directamente enfocados a tal fin. Estas son diferencias importantes de al menos el 20% entre el *Pong* y el resto de los juegos en la respuesta

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

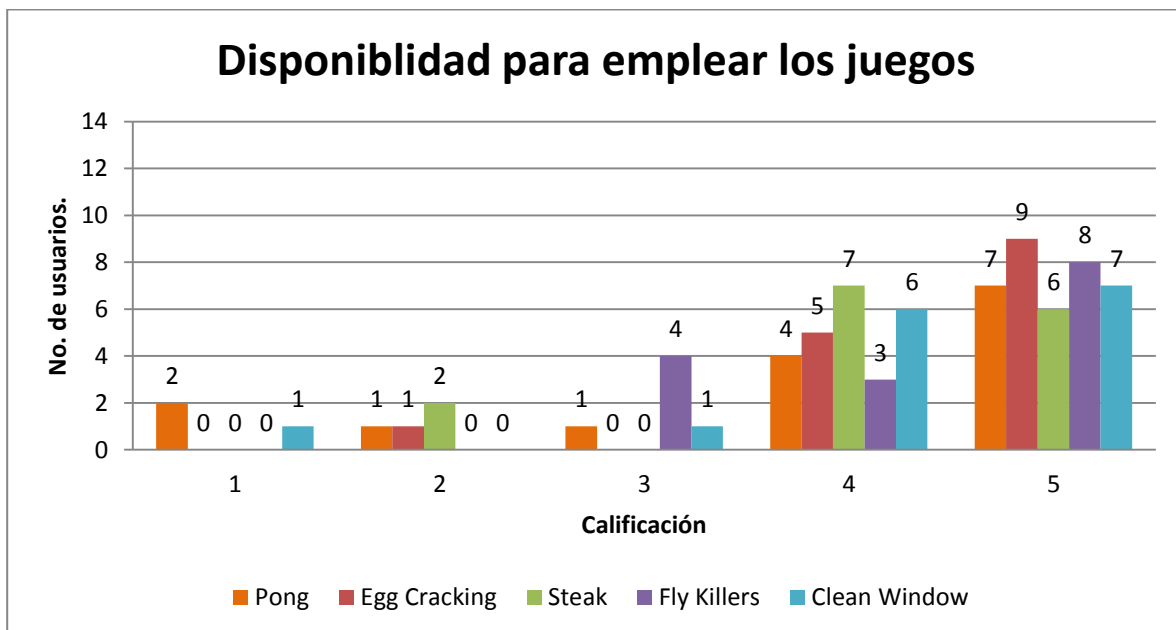
más favorable. Es más, un 20% de los usuarios calificó a Pong de indiferente a la hora de promover la rehabilitación, mientras que para otros juegos este porcentaje siempre estuvo por debajo de 7%.

Tolerancia.

El aspecto de la tolerancia evalúa la aceptación de la plataforma y en particular de los juegos por parte de los usuarios.

Propensión a utilizar los juegos.

El propósito de este elemento del cuestionario es examinar si existe una cierta inclinación al aprovechamiento de los juegos como un instrumento más dentro de la terapia. La Gráfica 5.10 sugiere que los participantes se encuentran cómodos ante la posibilidad de que juegos serios formen parte de una terapia de rehabilitación. Los mejores calificados con respecto a este aspecto fueron *Egg Cracking* y *Fly Killers* con un 60% y 53.3% respectivamente. Pero la poca diferencia entre los distintos juegos sugiere que los participantes pueden estar subconscientemente en el concepto como tal que en el juego en particular. Aunque la pregunta es particular acerca de los juegos, es factible pensar que esta pregunta pueda ser hasta cierto punto extrapolable a la percepción de los usuarios de la terapia basada en realidad virtual en general. Por otro lado, la pregunta tenía como objetivo evaluar al juego no al concepto, y por ende es posible que el planteamiento de la pregunta sea ambiguo.



Gráfica 5.10 La disponibilidad a utilizar los juegos no sólo responde a la tolerancia a utilizar los juegos probados en una terapia de rehabilitación, sino que puede ser interpretado como una respuesta representativa de la aceptación de las terapias de rehabilitación basadas en realidad virtual.

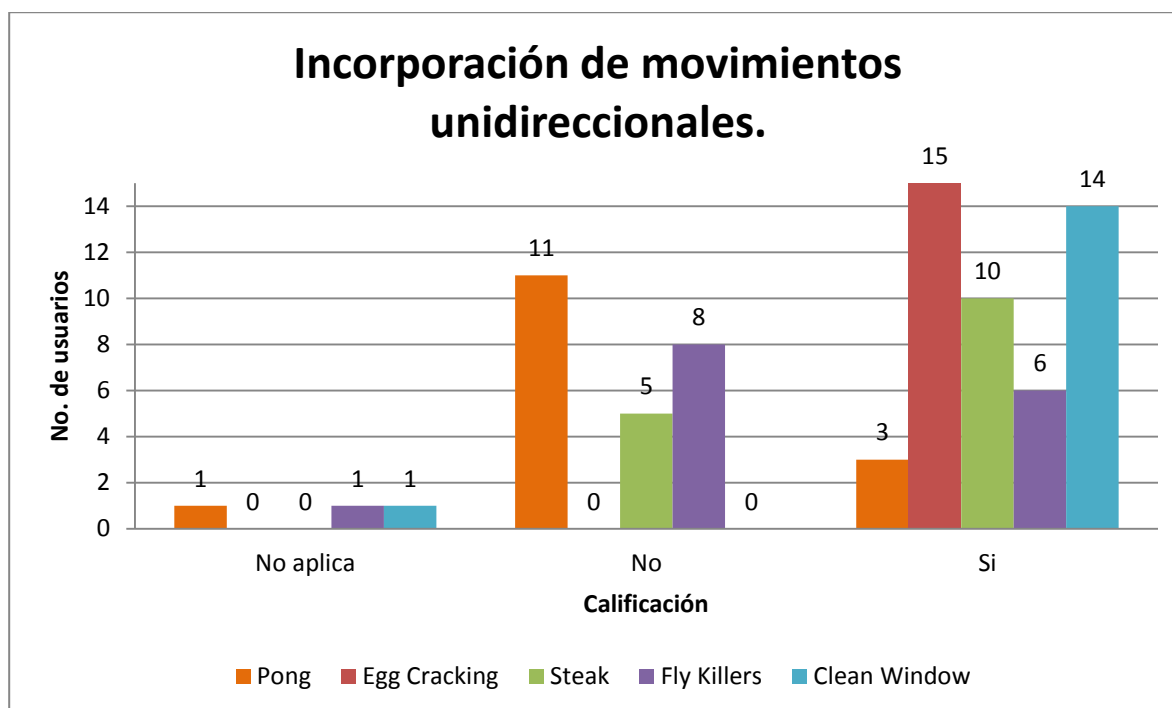
Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

5.3.2.3. Repetición de movimientos.

La repetición de movimientos es parte integral de una terapia de rehabilitación. No obstante el tipo de movimiento, la dosis e intensidad, y el hecho de si están incluidos en una secuencia compleja (y por tanto requiere de un uso intensivo de la memoria de trabajo) determinan la fase de la terapia para la que son apropiados. Movimientos unidireccionales (abducción del hombro, flexión del codo, etc.) como los utilizados en *Pong*, *Fly Killers*, o *Steak* pueden ser más efectivos en etapas tempranas de la terapia. Otros juegos en cambio emplean combinaciones de movimientos como es el caso de *Egg Cracking* y *Clean Window*, deben ser empleados para etapas intermedias del tratamiento.

Tipo de movimientos cubiertos.

Utilización de movimientos unidireccionales.



Gráfica 5.11 A pesar que todos los juegos incorporan movimientos unidireccionales, la pregunta puede no estar bien redactada de tal forma que fue interpretada de manera incorrecta y por lo tanto no cumplió su objetivo.

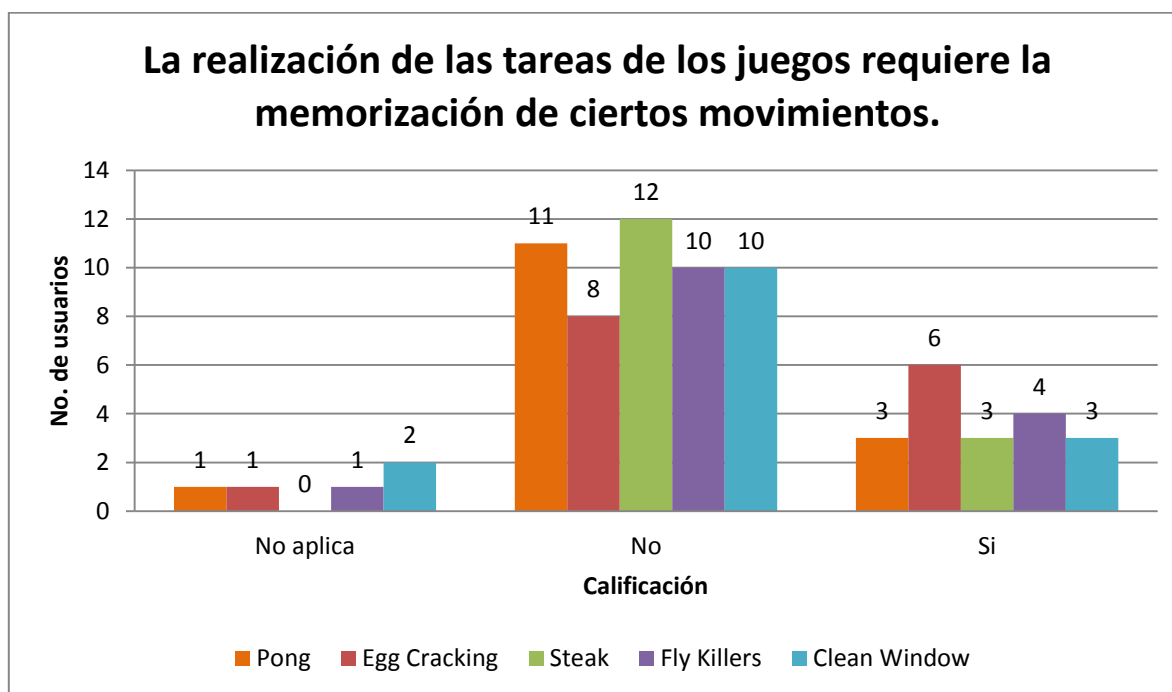
Partiendo de la premisa de que todos los juegos incorporan los movimientos unidireccionales, ya sea por si solos o como parte de movimientos complejos, evaluar la cobertura de dichos movimientos por parte de los juegos podría parecer superflua. No obstante, a la luz de los resultados indicados en la Gráfica 5.11 es obvio que o bien la pregunta esta incorrectamente formulada o el entendimiento de lo que es un movimiento unidireccional no es universal. En este caso, nos inclinamos por la primera opción; la pregunta está incorrectamente formulada. Actualmente la pregunta está formulada como:

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

"Cubre movimientos unidireccionales como: *arriba/abajo e izquierda/derecha*"

Aunque la intención de la pregunta era determinar si el juego incorporaba alguno de estos movimientos, esto podría haberse interpretado como que en un mismo juego están presentes ambos movimientos; el de *elevación/depresión (arriba/abajo)* y el de *aducción/abducción (izquierda/derecha)*. Cualquier juego que sólo incluya uno de estos, será marcado como que no cumple con los movimientos unidireccionales. Esto explicaría porque *Pong* es el más penalizado, ya que el movimiento vertical es absolutamente rígido, seguido de *Fly Killers* y *Steak*, que aunque están pensados para favorecer movimientos unidireccionales permiten una cierta variación de movimiento sobre el eje contraparte.

Memorización de movimientos.



Gráfica 5.12 Esta pregunta pretende medir el impacto sobre la memoria de trabajo y la manipulación de la información a nivel cognitivo. No obstante es interesante apreciar que los sujetos no creen estar utilizando la memoria en la ejecución de los movimientos.

La memoria de trabajo es el sistema cognitivo responsable de retener información para el razonamiento, comprensión y procesamiento de la información para llevar a cabo tareas con un determinado objetivo en presencia de distracciones. En infarto cerebral, la mejora motriz exhibida por los pacientes está asociada con el dominio viso-espacial de la memoria de trabajo, ya que la memoria de trabajo está asociada al aprendizaje de nuevas habilidades motoras, especialmente en las etapas iniciales del aprendizaje [20]. Una forma común de medir el uso de la memoria de trabajo en personas con daño cerebral es la conocida como *span measurement*, que consiste en mostrar al paciente una secuencia de objetos y pedirle que los recuerde en la misma secuencia en que

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

fueron mostrados [20]. Nuestra intención no es medir el uso de la memoria de trabajo *per se*, si no establecer la complejidad cognitiva de las tareas. Si el paciente percibe que necesita usar la memoria para recordar una secuencia de trabajo, la tarea es inherentemente más compleja que si el usuario percibe que la puede ejecutar sin necesidad de memorizar nada.

La Gráfica 5.12 resume las observaciones recogidas a este respecto. Entre un 53.3% y 80% de nuestra cohorte señalaron que para realizar las actividades de cada uno de los juegos no era necesario de memorizar los movimientos hechos, lo que nosotros interpretamos como un uso limitado de la memoria de trabajo y por ende de una baja carga cognitiva. El juego que demanda una mayor carga cognitiva acorde a este razonamiento es *Egg Cracking*, para el cual hasta un 40% de las observaciones indican la necesidad de memorizar algún movimiento.

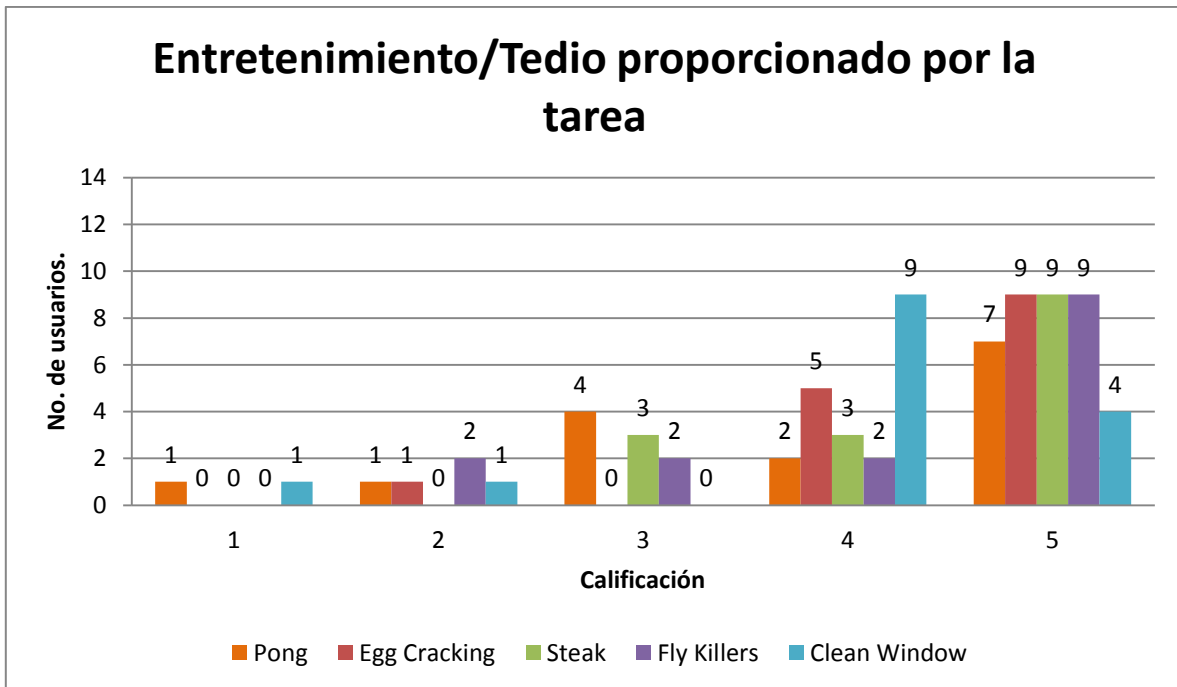
5.3.2.4. Sentido/Tareas significativas.

La repetición de movimientos por si sola es insuficiente para promover la recuperación motriz funcional, esta debe estar asociada al éxito incremental en una tarea específica [51]. Por recuperación motriz funcional entendemos la que permite al paciente ser autosuficiente en las actividades de la vida diaria. El concepto de la significancia de las tareas se refiere a la idea de que las tareas presentadas al paciente para facilitar su recuperación tengan un significado para el paciente. Por esta razón, a menudo se utilizan tareas cotidianas como cocinar, barrer, limpiar algún mueble, etc. Es comprensible que el uso de estas tareas cotidianas pueda ser percibido como algo tedioso, y por ende, carente del entretenimiento necesario para la motivación. En resumen, compatibilizar significancia y entretenimiento no es trivial. Los juegos deben procurar equilibrar ambos aspectos.

Entretenimiento proporcionado por la tarea.

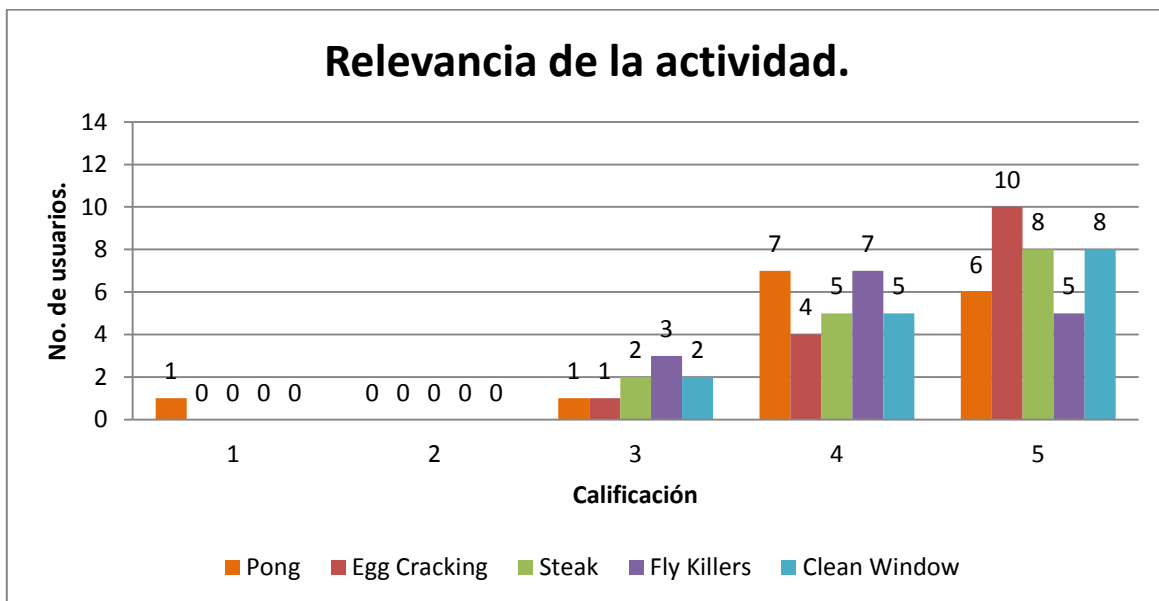
Esta pregunta está íntimamente relacionada con la evaluación del entretenimiento del juego de cara al interés suscitado presentada anteriormente. Se cuestionó a los participantes sobre la relación entretenimiento/tedio proporcionada por la tarea representada en el juego. Aunque como sugiere la Gráfica 5.13 los juegos fueron evaluados mayoritariamente como entretenidos, las colas de las distribuciones de las observaciones sugieren que hay un margen de mejora. Sorprendentemente, la actividad representada en el juego lúdico no es apreciada como la más entretenida, lo cual está en consonancia con el entretenimiento suscitado por el juego; si la tarea no es percibida como entretenida, difícilmente el juego va a ser percibido como entretenido. En este sentido con respecto a *Egg Cracking*, *Steak* y *Fly Killers*, el juego *Pong* estuvo en un 13.4% por debajo de ellos.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.



Gráfica 5.13 Evaluación del entretenimiento proporcionado por la tarea. Los valores más altos corresponden a una apreciación más entretenida de la tarea. Los valores más bajos corresponden a una valoración más tediosa de la tarea. Aunque todos los juegos son evaluados positivamente en el aspecto de entretenimiento, las colas de las distribuciones sugieren que hay margen de mejora.

Relevancia de la tarea.

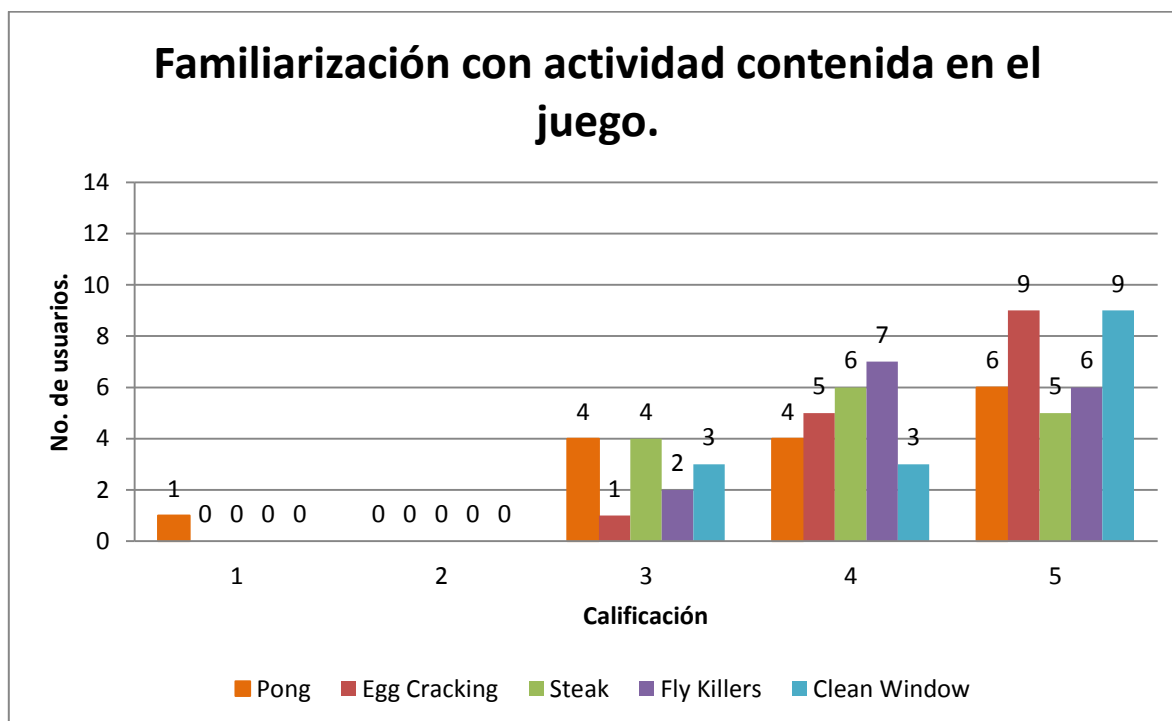


Gráfica 5.14. La relevancia de la tarea es el representante más claro de la significancia de la tarea. Las tareas domésticas son apreciadas como las más relevantes, aunque esto no necesariamente está asociado a una mayor cotidianeidad.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

La relevancia de las tareas es quizás el aspecto clave a la hora de determinar si una tarea es significativa o no. Las tareas domésticas, representadas en los juegos *Egg Cracking*, *Steak*, y *Clean Window* fueron valoradas como las más relevantes. Nótese que relevancia no está necesariamente en consonancia con la cotidianeidad de la tarea; no en vano, *Fly Killers*, que explota la que es posiblemente la tarea más común de todas, matar un insecto, recibe la calificación más templada (Gráfica 5.14). Como era esperable, *Pong* obtiene la distribución más alargada de todas, denotando que los participantes no tienen una percepción homogénea sobre la relevancia de la tarea.

Familiaridad de la tarea.



Gráfica 5.15. La familiaridad del participante con la tarea denota que tan habitual es para el participante realizar dicha tarea. El amplio abanico de respuestas es probable que sea debido a las diferencias en las experiencias personales.

La familiaridad con la tarea puede influir en la percepción sobre la relevancia de la tarea, de forma que tareas más habituales se podrían percibir como las más relevantes. Para tener una imagen más completa de la percepción de la significancia de las tareas por parte de los participantes, es relevante saber lo familiarizados que estos se encuentran con dicha tarea.

Las observaciones recogidas muestran un abanico de respuestas variadas (Gráfica 5.15) lo que interpretamos como la variabilidad esperable por la experiencia personal de cada participante. Hay participantes que están familiarizados con freír un huevo y otros que no, hay pacientes que están familiarizados con limpiar una ventana y otros que no. Pero en general todas las tareas son al menos reconocidas por los participantes, de ahí que las observaciones más bajas apunten a una calificación intermedia (3). Es interesante la observación de que un 6.7% mostraron que la activi-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

dad propuesta por *Pong* les era más habitual que *Steak*. Quizás pudiéramos buscar una explicación en la edad promedio de la cohorte; una cohorte joven es probable que esté más familiarizada con una tarea deportiva que con una tarea de cocina.

5.4. Análisis.

5.4.1. Validez aparente del cuestionario.

El primero de los objetivos del experimento es la validación aparente del cuestionario. Según nuestra hipótesis, si el cuestionario sirve para medir el apego de los juegos a los criterios de diseño recogidos en la taxonomía, el cuestionario debiera ser capaz de discriminar entre un juego desarrollado para ser utilizado en rehabilitación (*Egg Cracking*) y otro desarrollado originalmente para un fin lúdico (*Pong*). La capacidad discriminadora del cuestionario viene dado por la diferencia entre el juego de control implementado para rehabilitación (*Egg Cracking*) y el juego de control de origen lúdico. Mientras mayor sea esta diferencia, mayor es la capacidad discriminadora del cuestionario³.

Como se ha indicado, datos de tres sujetos fueron excluidos del análisis por diferentes incidencias. Los datos de los 15 sujetos restantes fueron utilizados para realizar el análisis pertinente. Para obtener un puntaje promedio por juego, se procedió como sigue. Primero se extrajeron promedios por pregunta y por participante. A continuación, se realizó el promedio de ambas medias. Los resultados se recogen en la Tabla 5.3.

Juego.	Promedio Total.
Pong	7.3
Egg Cracking.	8.3
Steak.	8.3
Fly Killers.	8.1
Clean Windows.	7.9

Tabla 5.3 Puntuaciones promedio totales de cada juego. Se puede observar una cierta diferencia entre *Egg cracking* y *Pong*, esto sugiere que nuestro cuestionario tiene cierta capacidad discriminativa.

En esta primera contabilización, la separación entre los dos juegos de control, *Egg Cracking* y *Pong*, es de 1 punto. Si se quiere maximizar el poder discriminador del cuestionario, para intentar pronunciar la diferencia entre ambos juegos de control podríamos elegir el subconjunto de preguntas en los que la diferencia entre el juego de rehabilitación, *Egg Cracking*, y el juego lúdico, *Pong* es mayor a favor del primero. La Gráfica 5.16 nos muestra aquellas preguntas clasificadas en donde *Egg Cracking* tiene una mayor diferencia con *Pong*. Tomando como subconjunto de preguntas válidas sólo aquellas en que *Egg Cracking* obtiene una mayor ventaja sobre *Pong*, podemos recalcular

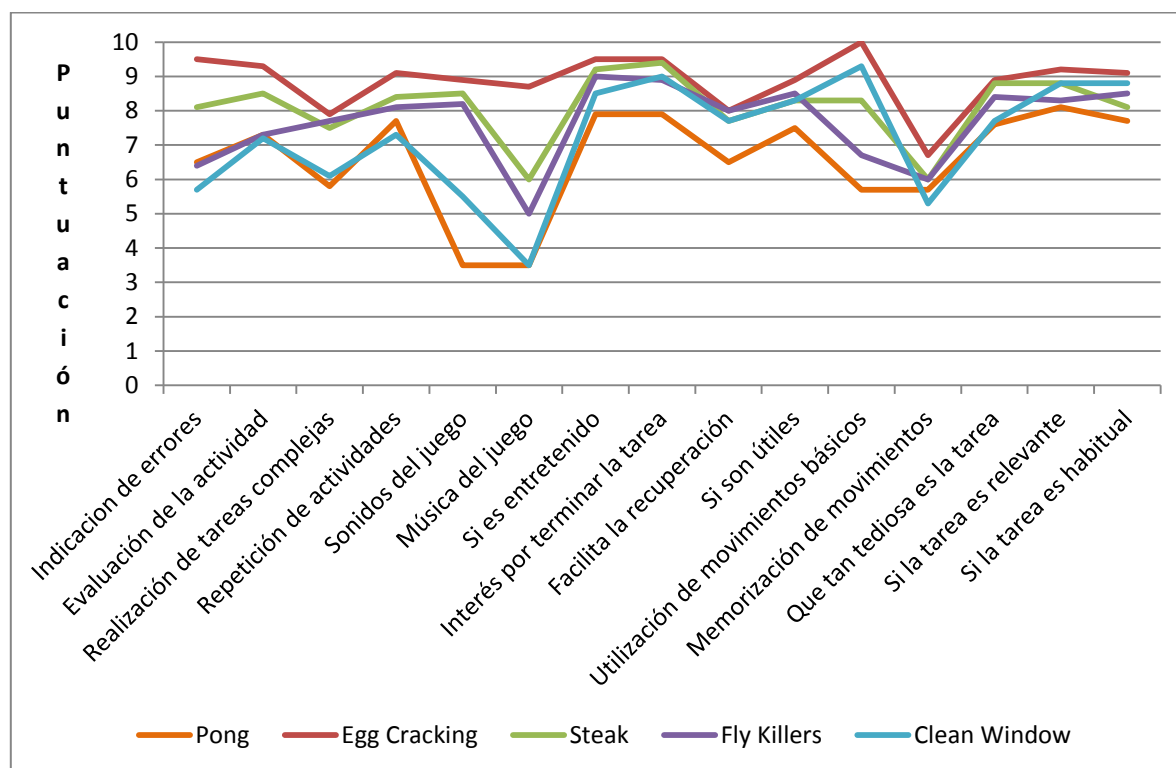
³ En última instancia, la capacidad discriminadora del cuestionario viene dada por el solape entre las distribuciones estadísticas de ambos juegos de control. La capacidad discriminadora será inversamente proporcional al solape entre ambas distribuciones. Esto puede resolverse con un test estadístico inferencial, pero queda más allá del alcance de esta tesis. A efectos de este trabajo, nos centraremos en simplemente maximizar la diferencia entre las calificaciones promedio de los juegos de control.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

las calificaciones promedio de los juegos. En la Tabla 5.4 se recogen las nuevas puntuaciones, y se puede apreciar el aumento de la diferencia entre ambos juegos de control en un 80%, hasta 1.8 puntos.

Juego	Promedio.	Mediana.	Varianza.
Pong.	6.9	7.5	2.4
Egg Cracking.	8.7	8.9	1.1
Steak.	8.0	8.3	1.3
Fly Killers.	7.7	8.1	1.6
Clean Windows.	7.4	7.7	2.4

Tabla 5.4 Puntuaciones promedio totales de cada juego utilizando únicamente un subconjunto de preguntas donde Egg Cracking es el más valorado. El intervalo que separa a ambos juegos de control se ha ampliado en un 80% hasta 1.8 puntos.

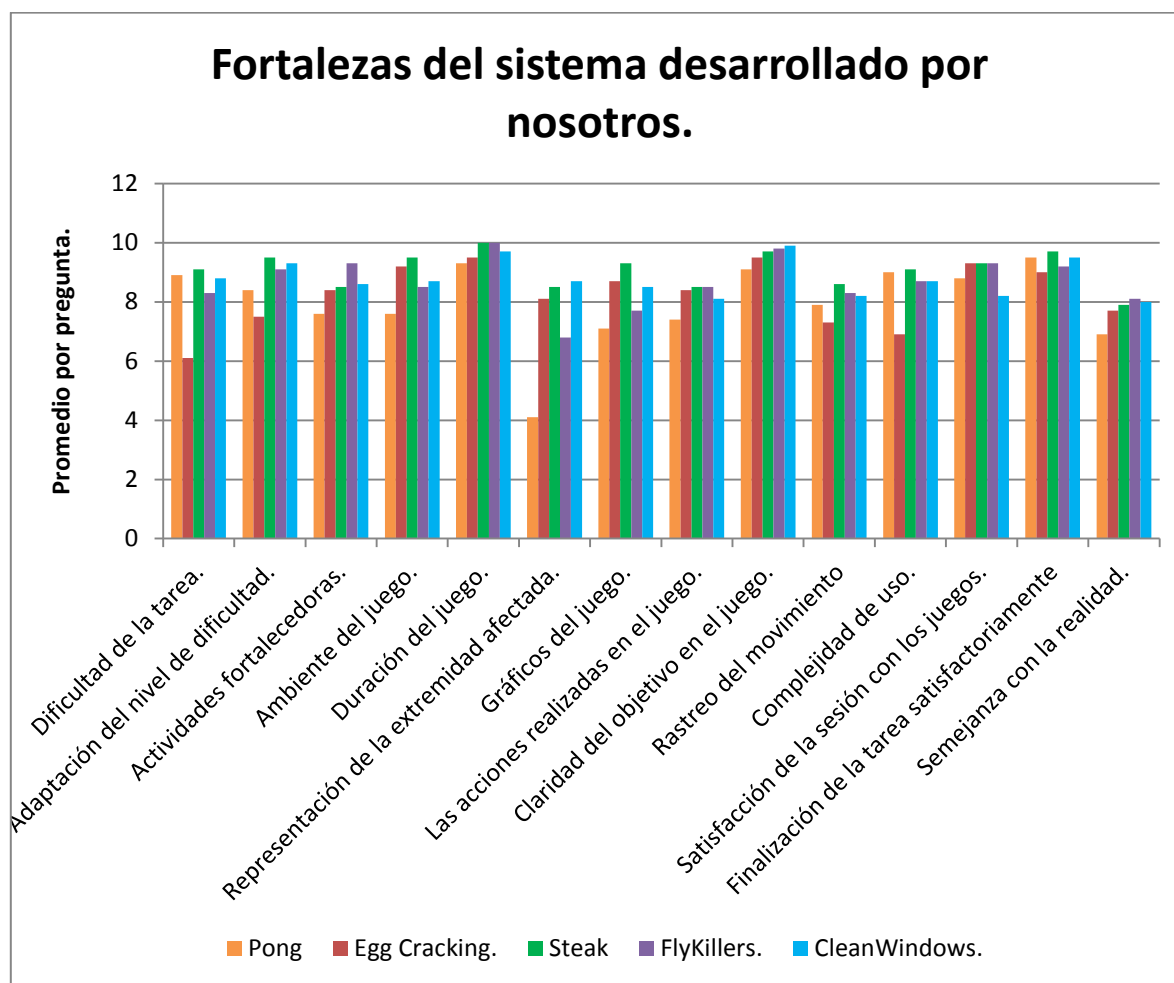


Gráfica 5.16 Puntuación promedio de los juegos en aquellas preguntas donde Egg cracking obtuvo una mayor diferencia con Pong.

Esta reducción a un subconjunto de preguntas potencia la capacidad discriminadora del cuestionario. Este puede entenderse como que sólo determinados aspectos (y no todos los considerados *a priori*) tienen la misma relevancia a la hora de distinguir un juego orientado a rehabilitación de un juego orientado al entretenimiento. En cualquier caso, ya sea tomando un subconjunto o el cuestionario completo, el juego orientado a rehabilitación ha puntuado más alto que el orientado al entretenimiento tal y como se esperaba. Esto confirma nuestra hipótesis de que el cuestionario tiene validez aparente (*face validity*).

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Este mismo cuestionario permitió evaluar el apego que nuestros juegos mostraban con respecto a la taxonomía planteada. El cuestionario, no sólo permite este tipo de evaluación, sino que puede ser utilizado como un indicador de las fortalezas y debilidades de los juegos. Por ejemplo, podríamos estar interesados en saber cuáles son las fortalezas de nuestros juegos por agravio comparativo. La grafica 5.17 presenta un resumen de aquellos aspectos en los que algunos de nuestros juegos supera al juego Egg Cracking usado como *gold standart* a lo largo de esta tesis.



Gráfica 5.17 Características en las que nuestros juegos tuvieron una buena evaluación con respecto al *gold standart* Egg Cracking. El cuestionario no sólo sirve para evaluar el apego de un juego a los criterios de desarrollo; también sirve como indicador de las fortalezas y debilidades de un juego por agravio comparativo.

5.4.2. Conformidad de los juegos desarrollados con la taxonomía.

El segundo objetivo del experimento era cuestionar si los juegos desarrollados cumplen con los criterios de desarrollo o se alejan de estos. Nuestra hipótesis era que, una vez validado el cuestionario, aquellos juegos que se adherían a los criterios de rehabilitación debían obtener puntajes similares o superiores al juego de control de rehabilitación, alejándose de la calificación obtenida por el juego de control lúdico. En las la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 se ha indicado la calificación tanto de

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

los juegos de control, como de los juegos desarrollados en esta tesis, para el cuestionario completo como para el subconjunto con mayor capacidad discriminativa. En ambos casos, nuestros juegos obtienen puntuaciones intermedias. En el primer caso, nuestros juegos se encuentran más cercanos a *Egg Cracking* que a *Pong*. En el segundo caso, *Steak* se mantiene más cercano a *Egg Cracking*, pero la diferencia en la calificación de los juegos *Clean Window* y *Fly Killers* es ahora menor con respecto a *Pong*. La valoración es positiva; nuestros juegos siempre califican por encima de *Pong*, y en un caso incluso igualan a *Egg Cracking*, y en este sentido consideramos que nuestros juegos tienen una validez terapéutica. No obstante, cuando el subconjunto de preguntas con mayor capacidad discriminativa es considerado, nuestros juegos ven expuestas sus debilidades, que deben ser corregidas para obtener el mayor desempeño de los pacientes.

5.5. LIMITACIONES DEL EXPERIMENTO.

En retrospectiva, nuestro experimento es mejorable en algunos sentidos que detallamos a continuación:

1. *Iluminación adecuada.* Para obtener una correcta funcionalidad de la plataforma de terapia de gestos es conveniente una iluminación constante. Desafortunadamente no contamos con eso. Factores externos hacían el seguimiento de la manija por parte del sistema de visión impreciso. La realización del experimento con algunos participantes se elaboró con la luz natural del cuarto y otros con la iluminación artificial del cuarto. Idealmente, esto debiera haber sido estandarizado.
2. *Instalaciones adecuadas.* El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de *Robótica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*. Si bien estructuralmente las instalaciones son adecuadas, existen factores no controlados tales como que la sala es compartida, el ruido ambiental, los cambios de temperatura, entre otros aspectos que pueden influir en la atención de los participantes, y por ende en el resultado final.
3. *Versión de los juegos.* Se utilizó una versión no muy pulida de los juegos debido a que faltan detalles de diseño como: una imagen atractiva de la interfaz, así como de los objetos que actúan en cada uno de los juegos, es decir; realizar una mejor retroalimentación visual para conseguir la atención de los sujetos a quienes van dirigidos. En el sonido en los juegos sólo tres de los 5 juegos contaban con sonidos ambientales, *Egg cracking*, *Steak* y *Fly Killers*. *Clean Window* y *Pong* no contaban con sonido alguno. Por otro lado, en la música de fondo el único que contaba con eso era *Egg Cracking*. El cuestionario incluye preguntas relacionadas con el sonido, lo que puede escorar la calificación final hacia los juegos que incorporan efectos sonoros y música.
4. *Niveles de dificultad.* En algunos de los juegos el nivel de desempeño se configuró de manera manual. En el caso del *Pong* y *Egg Cracking* se utilizó un nivel constante de dificultad.

5.6. OPINIONES DE ALGUNOS EXPERTOS.

La sección 5.3. RESULTADOS ha detallado los resultados de nuestro experimento y ha confirmado tanto la validez del cuestionario como el apego de nuestros juegos a los criterios de diseño. No

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

obstante, y a pesar de las consideraciones sobre el uso de sujetos sanos en la sección 5.2.1.1. ¿Por qué no evaluar a pacientes de infarto cerebral?, la extrapolación de estos resultados a pacientes de infarto cerebral no es inmediata. Aunque la experimentación con pacientes sanos queda fuera del alcance de esta tesis, completamos la información obtenida de nuestro experimento con las opiniones de especialistas en las áreas de computación y fisioterapia. Para esto se realizaron una serie de demostraciones de los juegos desarrollados por nosotros y el juego creado por la compañía Hocoma a los expertos. En el caso de la especialista en fisioterapia no fue necesario realizar una demostración del juego de la empresa *Hocoma* debido a que ya cuenta con experiencia previa con ese sistema. Los especialistas entrevistados fueron:

1. En el área de computación:
 - Dr. Juan Manuel González Calleros: Su especialidad es el área de interfaz humano-computadora. Actualmente es investigador en la Facultad de Computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
 - Dra. Josefina Guerrero García: Especialista en interfaz humano-computadora, investigadora en la Facultad de Computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
2. En el área de fisioterapia:
 - Dra. Paloma Álvarez: Especialista en fisioterapia. Actualmente, labora en el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía. Cuenta con experiencia previa en la plataforma *Gesture Therapy*.

A los expertos se les realizó una entrevista, preguntando acerca de los siguientes conceptos:

Concepto de los juegos.

Dra. Josefina Guerrero García *“Suena divertido y entretenido realizar la terapia, y no sólo estar viendo al terapeuta, o la pared, o el mismo brazo (dañado). Se encuentra al paciente en una actividad que se puede olvidar de su inmovilidad. Sin embargo, algunos pacientes no aceptarían la interacción con un videojuego. Así que hay que verificar el tipo de paciente a tratar y apoyarse con especialistas en terapia”*.

Dr. Juan Manuel González Calleros *“El concepto del juego es apropiado para el propósito para que sea creado. Los objetivos creo que se cubren y además tienen un extra que es la diversión”*.

Dra. Paloma Álvarez *“Para mí es un placer estar trabajando con realidad virtual, que puedo decir; me gusta mucho que los pacientes se sientan motivados en su terapia que puedan ver lo que han avanzado en cada sesión, esto los hace retarse cada vez”*.

La opinión de estos expertos coincide en que la utilización de los juegos como una herramienta de rehabilitación puede ser de gran ayuda para motivar al sujeto a realizar los ejercicios necesarios para recuperar su movilidad. Pero como menciona la Dra. Josefina siendo la población objetivo una que no tiene contacto constante con una computadora personal, es difícil hacer que adopten

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

los juegos como un medio más en su recuperación. Por esta razón es importante analizar cómo debe ser la actividad contenida en el juego con ayuda de un especialista en rehabilitación.

Retroalimentación e interfaz en los juegos.

Dr. Juan Manuel González Calleros *“La interfaz es difícil de interpretar para algunos juegos ya que sin una explicación oral no se puede interpretar la forma de usarla. Los gestos usados no son tan fácilmente interpretados y en ningún momento se anuncia que el control está fuera de rango de visión. Fácilmente en los juegos, la retroalimentación visual no es clara y además alejado del lugar donde se hace la interacción”*.

Dra. Josefina Guerrero *“Considerar con mayor precaución y detalle el uso de retroalimentación sonora y visual al momento del ejercicio del paciente. Esto puede desmotivar o afectar a la autoestima del paciente. El ruido o cualquier sonido pueden distraer al paciente. Dar una retroalimentación de su desempeño al final del ejercicio”*.

Dra. Paloma Álvarez *“Actualmente estoy trabajando con niños me he dado cuenta que los sonidos y algo de ficción les caería bastante bien. También después de cada juego hubiera una recompensa visual, quizás manos aplaudiendo, unos globos o algo más que active el sistema límbico. Con los adultos igualmente me ha ido bien, mucho apego al tratamiento, están motivados, aunque tienden más a la frustración que los niños. Los juegos en general están bien para ellos, de hecho es todo lo contrario que en los niños, les gustan los sonidos relajantes”*.

Analizando las opiniones hechas por los especialistas es necesario mejorar la retroalimentación de los juegos colocando sonidos y música adecuada para que sea de utilidad en su desempeño en las actividades. Además, sería conveniente ir indicando el progreso de la terapia para reforzar la motivación en realizar los ejercicios. Por último, la interfaz del sistema aún debe hacerse más transparente.

Otros juegos implementados en rehabilitación.

Dra. Josefina Guerrero *“En comparación con aquellos que utilizan interfaces naturales (como Kinect Xbox) es complicado tener en la mano un dispositivo que si el sistema no reconoce perfectamente no efectúa operación alguna. Sin embargo, con respecto a la presión que se ejerce en el dispositivo mide adecuadamente la fuerza que puede o no puede tener el paciente en su brazo-mano”*.

Dr. Juan Manuel González *“Creo que deben trabajar con expertos en rehabilitación que ayuden al diseño del concepto. Los videojuegos definitivamente son una opción adecuada al problema pero con expertos en rehabilitación podrían ayudar a platicar los problemas a resolver. Expertos en interfaces ayudarían a la parte visual y computólogos atacarían la eficiencia del sistema”*.

Con la experiencia adquirida en esta tesis, coincidimos con los expertos en que para diseñar un sistema de rehabilitación hay que ser bastante cuidadosos. Debemos seleccionar adecuadamente

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

los dispositivos a emplear para que estos no generen molestia física al sujeto, y que contengan la precisión necesaria para evaluar correctamente los movimientos realizados por el sujeto. En este sentido, la Dra. Guerrero lo ejemplifica con la precisión que puede obtenerse con el *Kinect*. Ciertamente, esta y otras plataformas comerciales como *Wii* y *PlayStation*, han sido probadas como alternativas de bajo coste para terapias de rehabilitación basadas en realidad virtual. No obstante, a día de hoy, estos esfuerzos son dispersos, y los juegos de estas plataformas no siempre tienen validez terapéutica. Adicionalmente, ninguno de estas plataformas es capaz de medir la presión realizada con los dedos para la recuperación de la mano.

5.7. CONCLUSIONES.

Este capítulo ha presentado un experimento con un objetivo doble: (i) validar la herramienta de valoración del apego a los criterios de diseño por parte de los usuarios, y (ii) determinar el apego del paquete de juegos desarrollados en esta tesis a los criterios de desarrollo. Para ello se reclutó una cohorte de tamaño medio (18 participantes), que jugaron a nuestros juegos y a otros dos juegos más que actuaron como control. Los resultados arrojados por nuestro experimento, si bien no son definitivos sugieren que (i) el cuestionario tiene validez aparente para discriminar juegos diseñados para rehabilitación de aquellos diseñados con interés lúdico, y (ii) que nuestros juegos se encuentran en una posición intermedia entre ambos juegos de control, lo que resulta como positivo pero admitiendo un margen de mejora.

Además de cumplir con sus objetivos iniciales, de forma colateral el experimento permitió identificar aquellos elementos de un juego en donde se puede observar una mayor diferencia entre un juego lúdico y uno de rehabilitación.

Finalmente, la opinión de los expertos consultado resalta algunos beneficios y limitaciones del sistema, tanto desde el punto de vista técnico, como desde el punto de vista clínico. En este sentido, sería conveniente mejorar cada característica de los juegos desarrollados, como en la retroalimentación tanto sonora así como la visual especialmente en el juego *Clean Window* que en la mayoría de los aspectos fue el peor calificado.

Capítulo 6 . Conclusiones y trabajo a futuro. ro.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

6.1 CONCLUSIONES FINALES.

Esta tesis partió de la necesidad de desarrollar un paquete de juegos propios para la plataforma *Gesture Therapy*. Para afrontar este reto, este trabajo estableció un marco de desarrollo de los juegos basándose en criterios clave para una terapia de rehabilitación que asegurasen su validez terapéutica, conjugados con elementos técnicos que consoliden su viabilidad práctica. Además, se construyó un paquete de juegos que implementaran estos criterios. El apego de los juegos a los criterios de desarrollo fue puesto a prueba mediante un experimento realizando una comparación contra juegos previamente existentes provenientes del área del entretenimiento y del área de rehabilitación. Las contribuciones de esta tesis a la ciencia son:

- Un marco de desarrollo de juegos serios para rehabilitación conformado por una taxonomía de criterios clínicos y técnicos que deben ser cubiertos para favorecer la validez terapéutica de los juegos.
- Un paquete de juegos para la plataforma de rehabilitación basada en realidad virtual *Gesture Therapy* que libera a esta plataforma de la dependencia de los juegos del sistema *Armeo* de *Hocoma*.
- Una herramienta de evaluación de la apreciación de los usuarios del apego de los juegos al marco de desarrollo. La herramienta ha sido validada y utilizada para confirmar que el paquete de juegos desarrollados en esta tesis contienen los elementos necesarios para satisfacer momentos particulares de una terapia de rehabilitación.

A todo esto podemos decir que hemos sido capaces de estructurar de manera correcta una base sólida para el desarrollo de juegos enfocados al área de rehabilitación motriz. Por otro lado en base a esto se han creado una serie de 3 juegos, los cuales no ocupan demasiados recursos económicos y tecnológicos para su implementación.

Las terapias basadas en realidad virtual son la más reciente alternativa desarrollada a las terapias clásicas disponibles para la rehabilitación motriz, y su gran atractivo es el aumento en la motivación del paciente para cumplir con la terapia. Los entornos virtuales desarrollados para las terapias de rehabilitación a menudo toman la forma de juegos serios que imitan actividades de la vida diaria. El desarrollo de estos juegos serios para dar soporte a este tipo de terapias requiere de la comprensión a fondo de un complejo juego de factores involucrados en el proceso de la rehabilitación. Desafortunadamente, el desconocimiento que envuelve a muchos de estos factores es aún preocupante, y como consecuencia el desarrollo de juegos serios para rehabilitación es más un arte que una ciencia. Para asegurar el valor terapéutico de los juegos, estos deben cumplir con los pilares de la rehabilitación: *repetición motriz, retroalimentación, motivación, intervención temprana y reentrenamiento orientado a tareas*. Armonizar todos estos elementos es una tarea ardua pero existen dispersos en la literatura algunos elementos que la facilitan. Uno de los objetivos iniciales de este proyecto era el establecimiento de un marco o taxonomía inicial que agrupara y estructurara estos criterios, investigando los elementos clave que hacen de un juego una herramienta efectiva de rehabilitación.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Por esta razón se llevó a cabo una revisión de la literatura científica relacionada extrayendo un conjunto de elementos que la comunidad científica acepta como factores implicados en la rehabilitación. A este conjunto de elementos individuales se post-agrupó bajo una estructura dictada por los pilares de la rehabilitación: *Estado inicial, parámetros clínicos de la terapia, motivación/compromiso, repetición de movimientos y sentido/tareas significativas*. Esto conforma una primera taxonomía de criterios de desarrollo de juegos para rehabilitación. La taxonomía incorpora una variedad de elementos clínicos y técnicos. En su forma actual la taxonomía determina un marco necesario pero no suficiente para asegurar que los juegos desarrollados bajo la misma tengan validez terapéutica.

La necesidad que origina este trabajo, es la carencia de la plataforma *Gesture Therapy* de un sistema de juegos propios que explotase al máximo las capacidades de esta plataforma. Aun cuando esta tesis se ha completado con la formulación de una taxonomía de criterios de desarrollo de juegos serios de rehabilitación y con una herramienta de evaluación del apego a la misma, el elemento central de esta tesis es el paquete de juegos para *Gesture Therapy*.

Tras una evaluación de los motores de juegos disponibles, nos decantamos por el *Torque Game Builder* que forma la piedra angular sobre la que se han desarrollado los juegos. El paquete de juegos desarrollado se comunica con el módulo de adaptación para ajustar de forma automática el nivel de dificultad del juego. A pesar de salir evaluados de forma positiva por los usuarios en lo referente a su apego a los criterios de diseño, la interfaz desarrollada fue cuestionada por los expertos en interfaz hombre-máquina.

Esta tesis ha desarrollado un paquete de tres juegos que combina movimientos unidireccionales y bidireccionales e incorpora ejercicios para la recuperación del brazo y de los dedos. En este sentido, se han cubierto movimientos de *elevación/depresión* y movimientos de *aducción/abducción*. Han quedado sin embargo sin cubrir las fases más avanzadas de la recuperación.

En esta tesis hemos diferenciado el hecho objetivo de que ciertos elementos estén presentes en un juego, del hecho subjetivo de que este elemento sea percibido por el usuario de forma que este pueda aprovecharlo para su rehabilitación. Por ejemplo, de nada serviría un *beep* de alarma ante un error si este es inaudible, o está enterrado en otro ruido distractor y no permite al usuario saber que ha cometido un error. La incorporación o ausencia de elementos básicos de la rehabilitación en los juegos puede ser relativamente fácil de cuantificar, pero no así el hecho de que estos elementos sean apreciables a través de la interfaz. En este sentido, esta tesis desarrolló una herramienta de evaluación del apego de los juegos a los criterios de la taxonomía especificada. El cuestionario demostró tener capacidad discriminativa siendo capaz de puntuar más alto a un juego originalmente pensado para su uso en rehabilitación, y otro juego originalmente pensado con un objetivo lúdico pero adaptado a rehabilitación. Nótese que ambos juegos habían sido previamente validados en la literatura como capaces de restaurar en cierto grado la motricidad de los pacientes.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

6.2 TRABAJO A FUTURO.

Este trabajo marca la continuidad de la línea de investigación abierta por *Gesture Therapy* en cuestión de la rehabilitación basada en realidad virtual. A esta plataforma se le ha añadido un paquete de juegos orientados a las etapas iniciales que hacen a esta plataforma totalmente independiente de terceros. No obstante, esta investigación ha abierto un nuevo camino en términos de construir los juegos bajo una perspectiva más de ingeniería y menos de artesanía mediante la delimitación de aquellos criterios necesarios para que un juego pueda garantizar cierto valor terapéutico, y más aun facilitando las herramientas básicas para evaluar su desempeño desde el punto de vista del usuario. No obstante, esto es sólo el punto de partida.

Las avenidas obvias para continuar el trabajo son la refinación de la taxonomía, el pulido de los juegos desarrollados o el desarrollo de nuevos juegos para cubrir los aspectos faltantes de la terapia. Otros aspectos menos obvios incluyen la incorporación de elementos de perfil de usuario en la plataforma *Gesture Therapy*, o de la incorporación de elementos de adaptación inter-juegos que afecten a la planeación de la terapia.

6.2.1. Una taxonomía más refinada, necesaria y suficiente.

En su versión actual la taxonomía estructura los criterios de desarrollo como subaspectos de los pilares de la rehabilitación. Aunque quizás obvia, esta estructura es demasiado rígida. Varias de las asignaciones de criterios a una cabecera pueden ser argumentativas. Acomodar nuevos criterios puede ser una tarea compleja. Además, la separación entre elementos técnicos (interfaz, gráficos, sonidos), no está claramente separada de aspectos clínicos (retroalimentación, dosis, etc.). En futuras versiones de la taxonomía criterios como la flexibilidad, la asignación difusa y la asignación de criterios multifactorial se deben de tener en cuenta.

Pero quizás más importante que todo esto es la necesidad de montar un marco de desarrollo que no sólo sea necesario como hasta ahora sino, necesario y suficiente. Este reto no es sencillo, pero su logro significaría que sería posible desarrollar juegos garantizando su validez terapéutica sin pasar por un ensayo clínico que la demuestre.

A medida que evolucione la taxonomía, también deberá hacerlo a la par, la herramienta de evaluación. Esta debe desdoblarse; por un lado debe incorporar una parte objetiva que recoja si un elemento de la taxonomía está o no presente en el juego, y por otro lado en la parte subjetiva de si un elemento es apreciable por el usuario y por tanto aprovechable. Lo primero puede conseguirse con una *checklist*. Lo segundo demanda una versión refinada de lo presentado en esta tesis, donde cada elemento es evaluado de forma redundante y bajo distintos puntos de vista, asegurando la coherencia de las respuestas del usuario.

6.2.2. Completar el paquete de juegos.

Los juegos desarrollados han cumplido con el objetivo inicial de hacer de *Gesture Therapy* una plataforma independiente de los juegos de *Hocoma*. No obstante, este paquete inicial de juegos (i) no cubre todas las necesidades de una terapia, y (ii) son individualmente susceptibles de mejora.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Lo primero requiere de la incorporación de nuevos juegos que cubran aquellas partes de la terapia no cubiertas por los juegos aquí desarrollados. Lo segundo, requiere (i) de la identificación de las fortalezas y debilidades de cada juego, para lo que el propio cuestionario puede ser una herramienta válida, y (ii) de la implementación de los aspectos faltantes o deficientes en los juegos. Además, no sólo es necesario presentar un conjunto de juegos completos en el sentido de cubrir todos los aspectos de la terapia de rehabilitación, se necesita redundancia; varios juegos cubriendo cada uno de los movimientos para garantizar la variabilidad. Esta redundancia permite aliviar el tedio de jugar siempre la misma tarea, y además permite llegar a una población más amplia variando la significancia de la tarea.

6.2.3. *Gesture Therapy*, una plataforma en evolución.

La propia plataforma *Gesture Therapy* está abierta a mejoras. La plataforma actual carece de capacidad para el seguimiento del progreso de los usuarios (*User profiling*). La implementación de esta característica pasa por la incorporación de una base de datos. De forma paralela a esta tesis se ha desarrollado un diseño inicial de lo que requeriría esta base de datos. En cuestión de los dispositivos de entrada se podría pensar en la incorporación de dispositivos controladores comerciales como “*Kinect*” para un mejor rastreo del movimiento, y reduciendo problemas de seguimiento por problemas de iluminación. Para el desplazamiento de los dedos ya se cuenta con un dispositivo de entrada llamado “*Finger Controller*” que cuenta con sensores ópticos para medir la distancia de cada uno de los dedos de la mano.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] <http://www.hocoma.com/en/products/armeo/>. Web.
- [2] Post-stroke rehabilitation fact sheet. Web, October 2008. Web: <http://www.ninds.nih.gov/disorders/stroke/poststrokerehab.htm>.
- [3] Gazihan Alankus, Amanda Lazar, Matt May, and Caitlin Kelleher. Towards customizable games for stroke rehabilitation. In *CHI2010: Proceeding of the 28th Annual Chi Conference on Human Factors in Computing Systems*, volume 1-4, pages 2113–2122, 1. Washington Univ, Dept. Comp Sci & Eng., St Louis, MO 63130 USA, April 2010. ACM, Assoc Computing Machinery, 1515 Broadway, New York, NY 10036-9998 USA.
- [4] Farshid Amirabdollahian, Germano T. Gomes, and Garth R. Johnson. The peg-in-hole: a vr-based haptic assessment for quantifying upper limb performance and skills. In *9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pages 422–425. IEEE, July 2005.
- [5] Shender Ávila-Sansores, Felipe Orihuela-Espina, and Luis Enrique Sucar. Patient tailored virtual rehabilitation. In *International Conference on NeuroRehabilitation (ICNR)*, 2012.
- [6] Héctor Avilés, Roger Luis, Juan Oropeza, Felipe Orihuela-Espina, Ronald Leder, Jorge Hernández-Franco, and Enrique Sucar. Gesture therapy 2.0: Adapting the rehabilitation therapy to the patient progress. In *Workshop in Probabilistic Problem Solving in BioMedicine at Artificial Intelligence in Medicine (AIME)*, pages 3–14, 2011.
- [7] John Bautista and José R. Navarro. Neuronas espejo y el aprendizaje en anestesia. *Revista Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia*, 59(4), Diciembre 2011. http://www.sci.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-00112011000400006&lng=es&nrm=iso.
- [8] J.W. Burke, M.D.J. McNeill, D.K. Charles, P.J. Morrow, J.H. Crosbie, and S.M. McDonough. Optimising engagement for stroke rehabilitation using serious games. *Visual Computer*, 25(25):1085–1099, December 2009.
- [9] Cinzia Calautti and Jean-Claude Baron. Functional neuroimaging studies of motor recovery after stroke in adults: a review. *Stroke*, 34:1553–1566, 2003.
- [10] PhD Catherine E. Lang, PT, Jillian R. MacDonald, and DPT Christopher Gnip. Counting repetitions: an observational study of outpatient therapy for people with hemiparesis post-stroke. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 31:3–10, March 2007.
- [11] MD Charles G. Burgar, PhD Peter S. Lum, OTR Peggy C. Shor, and PhD H.F. Machiel Van der Loos. Development of robots for rehabilitation therapy: The Palo Alto VA/Stanford experi-

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- ence. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 37(6):663–673, December 2000.
- [12] R. Chen, L. G. Cohen, and M. Hallet. Nervous system reorganization following injury. *Neuroscience*, 111(4):761 – 773, 2002.
- [13] MRCP C.I.M. Price, FRCP R.H. Curless, and FRCP H. Rodgers. Can stroke patients use visual analogue scales? *Stroke*, 30:1357–1361, 1999.
- [14] Roberto Colombo, Fabrizio Pisano, Alessandra Mazzone, Carmen Delconte, Silvestro Micera, M Chiara Carrozza, Paolo Dario, and Giuseppe Minuco. Design strategies to improve patient motivation during robot-aided rehabilitation. *NeuroEngineering and Rehabilitation*, 4, February 2007.
- [15] PhD David J. Reinkensmeyer, BS Leonard E. Kahn, PT Michele Averbuch, PT Alicia McKenna-Cole, PhD Brian D. Schmit, and PhD W. Zev Rymer, MD. Understanding treating arm movement impairment after chronic brain injury: progress with the arm guide. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 37(6):653–662, December 2000.
- [16] Niels De Ruyter, Sam Nees, Raymond Benjamin, Matt Nagel, XiaoQi Chen, and Marcus King. A variable resistance virtual exercise platform for physiotherapy rehabilitation. *International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pages 518–523, 2008.
- [17] Judith E. Deutsch, Megan Borbely, Jenny Filler, Karen Huhn, and Phyllis Guarrera-Bowlby. Use of a low-cost, commercially available gaming console (Wii) for rehabilitation of an adolescent with cerebral palsy. *Physical Therapy*, 88(10):1196–1207, 2008.
- [18] Michael A. Dimyan and Leonardo G. Cohen. Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke. *Nature Reviews Neurology*, 7:76–85, February 2011.
- [19] Eletha Flores, Gabriel Tobon, Ettore Cavallaro, Francesca I. Cavallaro, Joel C. Perry, and Thierry Keller. Improving patient motivation in game development for motor deficit rehabilitation. *Advances in Computer Entertainment Technology*, pages 381–384, 2008.
- [20] PhD Francine Malouin, PhD Sylvie Belleville, PhD Carol L. Richards, and PhD Julien Doyon. Working memory and mental practice outcomes after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85:117 – 183, February 2004.
- [21] James Frith and Julia Newton. Fatigue impact scale. *Occupational Medicine*, 60:159, 2010.
- [22] Ludwing Vincenzo Romero Funciell. Método Rood una alternativa terapéutica. [Http://www.efisioterapia.net/descargas/pdfs/226-metodo-rood.pdf](http://www.efisioterapia.net/descargas/pdfs/226-metodo-rood.pdf), September 2009. Web: <http://www.efisioterapia.net/descargas/pdfs/226-metodo-rood.pdf>.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- [23] Luciano Gamberini, Mariano Alcaniz, Giacinto Barresi, Malena Fabregat, Lisa Prontu, and Bruno Seraglia. Playing for a real bonus: videogames to empower elderly people. *Cybertherapy & Rehabilitation*, 1(1):37–48, Spring 2008.
- [24] Garage Games. Torque engine. Web, Septiembre 2010. <http://garagegames.com/>.
- [25] Ana María Domingo García. Tratamiento de terapia ocupacional en el accidente cerebrovascular. *Revista Gallega de Terapia Ocupacional*, (3), Febrero 2006.
- [26] M. T. Florez García. Intervenciones para mejorar la función motora en el paciente con ictus. *Rehabilitación*, vol. 34(6):423–437, 2000.
- [27] M. T. Florez García. Intervenciones para mejorar la función motora en el paciente con ictus. *Revista de la Sociedad Española de Rehabilitación y Medicina Física*, 41:423–437, 2000.
- [28] E. García Diez. Fisioterapia de la espasticidad: técnicas y métodos. *Fisioterapia*, 26:25–35, 2004.
- [29] MSc Gert Kwakkel, PhD Robert C. Wagenaar, PT Tim W. Koelman, PhD Gustaaf J. Lankhorst, MD, and PhD Johan C. Koetsier, MD. Effects of intensity of rehabilitation after stroke. *Stroke*, 28:1550–1556, 1997.
- [30] Domien Gijbels, Ilse Lamers, Lore Kerkhofs, Geert Alders, Els Knippenberg, and Peter Feys. Armeo spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 8, 2011.
- [31] Leigh A. Hale. Community “based or home-based stroke rehabilitation: confusion or common sense? *New Zealand Journal of Physiotherapy*, 32(3):131 – 139, 2004.
- [32] Kristen Harris and Denise Reid. The influence of virtual reality play on children’s motivation. *The Canadian Journal of Occupational Therapy*, 72(1):21, February 2005.
- [33] Jesse Hoey, Andrew Monk, and Alex Mihailidis. People, sensors, decisions: customizable and adaptive technologies for assistance in healthcare. In *POMDP Practitioners Workshop*, May 2010.
- [34] Sarah J. Housman, Vu Le, Tariq Rahman, Jr Robert J. Sanchez, , and IEEE David J. Reinkensmeyer, Member. Arm-training with T-Wrex after chronic stroke: preliminary results of a randomized controlled trial. In *IEEE 10th International Conference on in Rehabilitation Robotics*, pages 562–568, 2007.
- [35] Meghan Huber, Bryan Rabin, Ciprian Docan, IEEE Grigore Burdea Senior Member, Michelle E. Nwosu, IEEE Moustafa Abdelbaky, student Member, and Meredith R. Golomb.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- PlayStation 3 based telerehabilitation for children with hemiplegia. In *Virtual Rehabilitation*, pages 105–112. IEEE, September 2008.
- [36] BA Janet L. Ingles, PhD Gail A. Eskes, and MB Stephen J. Phillips. Fatigue after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 80:173–178, February 1999.
- [37] MD Joachim Liepert, PhD Heike Bauder, PhD Wolfgang H. R. Miltner, PhD Edward Taub, and MD Cornelius Weiller. Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans. *Stroke*, 31:1210–1216, 2000.
- [38] OT(C) Johanne Desrosiers, PhD, MD Réjean Hébert, PhD Gina Bravo, and OT(C) Elisabeth Dutil, MSc. Upper extremity performance test for the elderly (tempa): normative data and correlates with sensorimotor parameters. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76:1125–1129, December 1995.
- [39] PhD Scholar (Neurology) Sr. Occupational Therapist Kamal Narayan Arya, MOT, Superintendent OT (OPD) Shanta Pandian, MOT (Neurology), DNB (Neurology) Professor Rajesh Verma, DM (Neurology), and Professor & HOD. R.K. Garg, DM (Neurology). Movement therapy induced neural reorganization and motor recovery in stroke: a review. *Bodywork and Movement Therapies*, 15(4):528–537, October 2011.
- [40] John W. Krakauer. Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation. *Current Opinion in Neurology*, 19:84–90, 2006.
- [41] Gert Kwakkel. Intensity of practice after stroke: more is better. *Schweizer Archiv Für Neurologie und Psychiatrie*, 160:295–298, 2009.
- [42] Olivier Lambercy, Ludovic Dovat, Hong Yun, Seng Kwee Wee, Christopher Kuah, Karen Chua, Roger Gassert, Theodore Milner, Teo Chee Leong, and Etienne Burdet. Rehabilitation of grasping and forearm pronation/supination with the haptic knob. In *11TH International Conference On Rehabilitation Robotics*, volume 1 & 2 of *International Conference on Rehabilitation Robotics ICORR*, pages 26–31, Natl Univ Singapore, Dept. Mech Eng., Singapore, Singapore, Junio 2009. IEE, IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA.
- [43] Peter Langhorne, Fiona Coupar, and Alex Pollock. Motor recovery after stroke: a systematic review. *The Lancet Neurology*, 8:741–754, August 2009.
- [44] FRCP Langhorne P., PhD, FRCP Stott D.J., MD, RGN Robertson L., FRCP MacDonald J., RGN Jones L., FRCP McAlpine C., RGN Dick F., BSc Taylor G.S., and PhD Murray G. Medical complications after stroke a multicenter study. *Stroke*, 31:1223–1229, 2000.
- [45] Ron S. Leder*, Gil Azcarate, Rodrigo Savage, Saiph Savage, L. Enrique Sucar*, David Reinkensmeyer*, and Ariel Molina *Miembros IEEE Carlos Toxtli, Emilio Roth. Nintendo Wii

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- remote for computer simulated arm and wrist therapy in stroke survivors with extremity hemiparesis. In *Virtual Rehabilitation*, page 74. IEEE, September 2008.
- [46] Mindy F. Levin, Jeffrey A. Kleim, and Steven L. Wolf. What do motor "recovery" and "compensation" mean in patients following stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 23(4):313 – 319, May 2009.
- [47] Mindy F. Levin, Stella M. Michaelson, Carmen M. Cirstea, and Agn s Roby-Brami. Use of the trunk for reaching targets placed within and beyond the reach in adult hemiparesis. *Experimental Brain Research*, 143(2):171–180, January 2002.
- [48] Donald Lloyd-Jones, Robert J. Adams, Todd M. Brown, Mercedes Carnethon, Shifan Dai, Giovanni De Simone, T. Bruce Ferguson, Earl Ford, Karen Furie, Cathleen Gillespie, Alan Go, Kurt Greenlund, Nancy Haase, Susan Hailpern and P. Michael Ho, Virginia Howard, Brett Kissela, Steven Kittner, Daniel Lackland, Lynda Lisabeth, Ariane Marelli, Mary M. McDermott, James Meigs, Dariush Mozaffarian, Michael Mussolino, Graham Nichol, Véronique L. Roger, Wayne Rosamond, Ralph Sacco, Paul Sorlie, Randall Stafford, Thomas Thom, Sylvia Wasserthiel-Smoller, Nathan D. Wong, Judith Wylie-Rosett, Judith Wylie-Rosett on behalf of the Wasserthiel-Smoller, Nathan D. Wong, and on behalf of the Circulation. Stroke (cerebrovascular disease). *Circulation Journal of the American Heart Association*, pages 99–113, 2010.
- [49] R. C. V. Loureiro, D. Valentine, B. Lamperd, C. Collin, and W. S. Harwin. *Designing inclusive interaction. Chapter 21: Gaming and Social Interactions in the rehabilitation of Brain Injuries: A Pilot Study with Nintendo Wii Console*. Springer, 1 St. Edition, 2010.
- [50] Minhua Ma and Kamal Bechkoum. Serious games for movement therapy after stroke. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.*, pages 1872–1877, 2008.
- [51] PhD Maureen K. Holden. Virtual environments for motor rehabilitation: review. *Cyberpsychology & Behavior*, 8(3):187–211, 2005.
- [52] Edward McAuley, Terry Duncan, and Vance V. Tammen. Psychometric properties of the intrinsic motivation inventory in a competitive sport setting: A confirmatory factor analysis. *Research Quarterly for exercise and sport*, 60(1):48–58, 1989.
- [53] Alison McMahan. *Chapter 3 Immersion, engagement and presence a method for analyzing 3-D video games*, volume 11. April 2003.
- [54] Gillian E. Mead, Catriona Graham, Paul Dorman, Karsten Bruins Slot, Steff C. Lewis, Martin S. Dennis, and Peter A. G. Sandercock. Fatigue after stroke: baseline predictors and influence on survival. Analysis of data from UK patients recruited in the international stroke trial. *PLOS ONE*, 6(e16988), March 2011.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- [55] Stella Maris Michaelsen, Ruth Dannenbaum, and Mindy F. Levin. Task-specific training with trunk restraint on arm recovery in stroke: Randomized control trial. *Stroke*, 37:186–192, 2006.
- [56] Felipe Orihuela-Espina and Luis Enrique Sucar. Functional reorganization strategies associated to motor rehabilitation gesture therapy. Technical Report CCC-11-001, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Coordinación de Ciencias Computacionales, Luis Enrique Erro 1, Sta. Ma. Tonantzintla, 72840, Puebla, México., Junio 2011.
- [57] PhD Peter S. Lum, MD Charles G. Burgar, PhD Machiel Van der Loos, OTR Peggy C. Shor, OTR Matra Majmundar, and MS Ruth Yap. Mime robotic device for upper-limb neurorehabilitation in subacute stroke subjects: A follow-up study. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 43(5):631–642, August/September 2006.
- [58] Girijesh Prasad, Pawel Herman, Damien Coyle, Suzanne McDonough, and Jacqueline Crosbie. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, pages 1–17, 2010.
- [59] G. Eliezer Quintana, L. Enrique Sucar, and Gildardo Azcárate. Qualification of arm gestures using hidden Markov models. In *8th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*, pages 1–6. IEEE, September 2008.
- [60] Marijke Rensink, Marieke Schuurmans, Eline Lindeman, and Thóra Hafsteinsdottir. Task-oriented training in rehabilitation after stroke: systematic review. *Advanced Nursing*, 65(4):737–754, April 2009.
- [61] Richard M. Ryan. Control and information in the intrapersonal sphere: An extension of cognitive evaluation theory. *Personality and Social Psychology*, 43(3):450–461, 1982.
- [62] José Ma. Sabater. Ayuda robótica para la rehabilitación de los miembros superiores. // *Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para todos*, pages: 19–28, 2007.
- [63] Robert J. Sanchez, Jiayin Liu, Sandhya Rao, Punit Shah, Robert Smith, Tariq Rahman, Steven C. Cramer, James E. Bobrow, and IEEE David J. Reinkensmeyer, Member. Automating arm movement training following severe stroke: functional exercises with quantitative feedback in a gravity-reduced environment. *IEEE Transactions on Neuronal Systems and Rehabilitation Engineering*, 14(3):378–389, September 2006.
- [64] MS Sarah A. Maulden, MD, RN Julie Gassaway, MS, PhD Susan D. Horn, MS Randall J. Smout, and PhD Gerben DeJong. Timing of initiation of rehabilitation after stroke. *American Congress of Rehabilitation Medicine*, 86:s34–40, December 2005.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- [65] PhD Sergei V. Adamovich, DPT Gerard G. Fluet, PT, PhD Eugene Tunik, PT, and PhD Alma S. Merians, PT. Sensorimotor training in virtual reality: a review. *NeuroRehabilitation*, 25, 2009.
- [66] PhD Sheryl Flynn, PT, PT Phyllis Palma, and PT Anneke Bender. Feasibility of using the Sony PlayStation 2 gaming platform for an individual poststroke: A case report. *JNPT Neurology Section*, 31:180–189, December 2007.
- [67] Mel Slater, Vasilis Linakis, Martin Usoh, and Rob Kooper. Immersion, presence, and performance in virtual environments: an experiment with tri-dimensional chess. *ACM virtual reality software and technology (VRST)*, pages 163–172, July 1996.
- [68] L. Enrique Sucar, Ron Leder, Jorge Hernández, Israel Sánchez, and Gildardo Azcárate. Clinical evaluation of a low-cost alternative for stroke rehabilitation. In *IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics Kyoto International Conference Center*, pages 863–866, June 2009.
- [69] L. Enrique Sucar, Ron S. Leder, David Reinkensmeyer, Jorge Hernández, Gidardo Azcarate, Nallely Castañeda, and Pedro Saucedo. Gesture therapy a low-cost vision-based system for rehabilitation after stroke. In *International Conference on Health Informatic*, 2008.
- [70] L. Enrique Sucar, Roger Luis, Ron Leder, Jorge Hernández, and Israel Sánchez. Gesture therapy: A vision-based system for upper extremity stroke rehabilitation. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, pages 3690–3693, September 2010.
- [71] L. Enrique Sucar, Ariel Molina, Ronald Leder, Jorge Hernández, and Israel Sánchez. Gesture therapy: a clinical evaluation. In *3rd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 2009. PervasiveHealth 2009*, pages 1–5, April 2009.
- [72] Luis Enrique Sucar, Felipe Orihuela-Espina, Roger Luis Velazquez, IEEE David J. Reinkensmeyer, Member, IEEE Ronald Leder, Member, and Jorge Hernández-Franco. Gesture therapy: An upper limb virtual reality-based motor rehabilitation platform. In *Preparation*.
- [73] Luis Enrique Sucar, Felipe Orihuela-Espina, Paulette Zorrilla, and Isabel Medina Tiro. *User's manual Gesture Therapy*. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), 2012.
- [74] Anna-Sofia Alklind Taylor, Per Backlund, Henrick Engström, Michael Johannesson, and Mikael Lebram. Gamers against all odds. *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–12, 2009.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- [75] Emanuel Todorov, Reza Shadmehr, and Emilio Bizzi. Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task. *Journal of Motor Behavior*, 29(2):147–158, April 2010.
- [76] Inc Traducción por Dr. Tango. Accidente cerebrovascular. David Zieve, MD, MHA, Medical Director, A.D.A.M., Inc, Junio 2006. Web: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/000726.htm>.
- [77] América Valenzuela and Raquel Barba. El accidente cerebrovascular, Septiembre 2006. web: <http://www.elmundo.es/elmundosalud/documentos/2006/10/ictus.html>.
- [78] Martha Elena Valverde and María del Pilar Serrano. Terapia de neurodesarrollo: Concepto Bobath. *Plasticidad y Restauración Neurológica: Nuevos Horizontes en la Restauración Neurológica*, 2(2):139–142, Julio-Diciembre 2003.
- [79] Marion Fraser Walker. *A randomised controlled trial of occupational therapy for stroke patients not admitted to hospital*. Thesis (PhD), University of Nottingham>UK Campuses > Faculty of Medicine and Health Sciences > School of Clinical Sciences > Former School of Medical and Surgical Sciences, 24 October 2009.

APÉNDICE

Apéndice 1. Protocolo de experimentación.

INFORMACIÓN.

La Terapia de Gestos es una idea innovadora la cual pretende rehabilitar la motricidad de sus extremidades superiores después de que han sufrido un infarto cerebral, esto lo hace mediante el uso de juegos los cuales simulan actividades de la vida cotidiana. Para desarrollar este tipo de juegos deben de cubrir ciertas necesidades distintas a la de un juego comercial, por lo tanto hay ciertas particularidades que están obligados a cumplir y es por eso que para el desarrollo de juegos propios es aún tema de investigación.

JUSTIFICACIÓN.

1. Se tiene un desconocimiento sobre las particularidades las cuales debe de contener un juego utilizado en terapia de rehabilitación.
2. La plataforma Terapia de Gestos actualmente no cuenta con una considerable cantidad de juegos propios y lo que se quiere es prescindir de los juegos de Hocoma.

OBJETIVOS.

- I. Evaluar un marco teórico propuesto para auxiliar en el desarrollo de juegos que se enfoquen a la rehabilitación motora de sujetos que hayan tenido problemas cerebro-vasculares.
 1. Que los principios que estamos dando caracterizan el diseño de juegos enfocados a la rehabilitación.
 2. Observar que tanto un juego que ya se está aplicando con personas que han sufrido problemas cerebro-vasculares que tanto se adecúa a nuestros criterios.
 3. Validar el cuestionario que evalúa la adherencia a los criterios de rehabilitación en base a una comparación entre juegos comerciales lúdicos y de rehabilitación.
- II. Evaluar la adherencia a estos criterios de un paquete de juegos de desarrollo propio.
 1. Si en base a la propuesta se pueda observar que juegos comerciales lúdicos sean adaptables para su uso en rehabilitación.

COHORTE DE EXPERIMENTACIÓN.

La cohorte estará integrada por:

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

1. 20 personas entre las edades de 18 – 40 años de edad.
2. Sin malestares musculares permanentes o temporales.
3. Visión 20/20 con o sin lentes correctores.
4. Dispuestas a participar en el experimento.

LO QUE SE ESPERA DE LOS PARTICIPANTES.

1. Que permanezca durante el tiempo establecido (1 hora).
2. Completar el tiempo establecido en los juegos (3 minutos).
3. Que conteste el cuestionario honestamente.

DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO.

El sujeto jugará una serie de 5 juegos: El *Pong* (comercial lúdico), *Egg Cracking* (*Hocoma*, comercial para rehabilitación), y *Fly Killers*, *Clean Window*, *Steak* (desarrollo propio basado en nuestro marco propuesto). Tras cada juego el sujeto evaluará los juegos mediante un cuestionario que se le proporcionará, la información se utilizará para ver que tanto se apegan los juegos a los criterios que deben cumplir los juegos para rehabilitación que nosotros estamos proponiendo.

DESARROLLO DE LA PRUEBA.

1. Se citará a la persona en un horario determinado y se le dará instrucciones de cómo llegar al lugar en donde se desarrollará el ensayo (Laboratorio de robótica, INAOE).
2. Se le dará una hoja con la información del experimento y se le aclararán dudas en caso de tenerlas.
3. Proporcionaremos la hoja de consentimiento, para su participación en este ensayo.
4. Aleatoriamente será el orden de los juegos.
5. Se indicará cual es el objetivo de cada juego, el tiempo que jugará cada juego (3 min).
6. Una vez terminado de jugar en el tiempo establecido en el juego, le proporcionaremos el cuestionario para la evaluación del mismo.
7. El investigador guardará la bitácora del juego en un archivo de texto.
8. La prueba se dará por finalizada hasta que la persona haya evaluado todos los juegos.

PRIVACIDAD.

Una vez que el sujeto consienta participar en el experimento, se le asignará un identificador numérico (ID) por el cuál será después reconocido. Solo el investigador tendrá acceso al nombre del sujeto. En ningún momento el sujeto podrá ser identificado si no es por su identificador. Esto aplica tanto al análisis como en las publicaciones que se deriven de esta investigación.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

EVALUACIÓN.

Primero se evaluará el cuestionario. Para ello se tomarán las puntuaciones obtenidas por los juegos comerciales. La hipótesis es que el juego lúdico obtenga menor puntuación que el juego que está diseñado para rehabilitación.

La segunda parte evalúa la adherencia de los juegos de desarrollo propio a los criterios requeridos para rehabilitación y recogidos en el cuestionario, previamente validado. Esta se hará por medio del cuestionario desarrollado a tal efecto para evaluar los juegos en base a los criterios propuestos en el marco teórico. El cuestionario se anexa en apéndice 2

También lo que se estaría evaluando los datos que proporcionen los juegos. Como por ejemplo ver como sube o baja de nivel, la rapidez de los movimientos, entre otros. La hipótesis es que los juegos propuestos deben de presentar un nivel de adherencia similar o mayor al juego de rehabilitación comercial.

ACONTECIMIENTOS ADVERSOS.

- Que la persona no pueda llegar al lugar establecido. Se tratará de reprogramar la cita en otro día, siempre y cuando no exceda el límite de tiempo del experimento (2 semanas).
- Que no llegue a la hora asignada. Se reprogramará la cita, en caso de que ya no le sea posible participar entonces se descartará al individuo.
- Tamaño de la cohorte (20 sujetos) y aleatoriedad.
- El lugar donde se lleve el experimento no sea adecuado, es decir, que no tenga las condiciones adecuadas como: un lugar correctamente acondicionado, ausencia de distracciones para la persona durante la ejecución del experimento.
- Que no esté de acuerdo con lo establecido en la hoja de información. Se le agradecerá por el tiempo invertido y se descartará al individuo.
- Que no entienda las indicaciones. Se le explicarán los puntos que no entienda de la información.
- No entienda el objetivo del juego. El investigador el cual va a recoger los datos realizará una demostración durante 30 segundos.
- Ausencia de energía eléctrica. Se utilizará un equipo portátil el cual estará conectado a la toma de corriente para que no se apague y tenga energía de reserva.
- Si el sistema se bloquea. Se reiniciará el equipo.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.

- En el lugar haya silencio, o en su defecto el ruido no le impida realizar la prueba.
- El sistema se está bastante saturado pero que no afecte el funcionamiento de los juegos.
- El seguimiento de movimientos sea bastante lento. Esto se considera por lo mismo que fue diseñado para personas con poca capacidad motriz.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Apéndice 2. Cuestionario de Evaluación.

ID:

Edad:

Juego:

I) Ventana de oportunidad.

- 1) ¿Hace cuánto tiempo tiene que tuvo un problema cerebro-vascular? Si ha padecido de uno o más, favor de indicar con respecto a este cuando fue el último episodio de este. Encerrar en un círculo la opción correspondiente.

Menos de 2 días.	Entre 2 días y 2 semanas	2 semanas a 3 meses	Más de 3 meses.	No aplica.
------------------	--------------------------	---------------------	-----------------	------------

II) Sesión

- 1) Las actividades que se realizaron en los juegos fueron. Encerrar en un círculo la opción correspondiente:

Muy difícil.	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">1</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">2</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">3</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">4</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">5</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">6</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">7</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">8</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">9</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">10</td> </tr> </table>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Fácil.
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			

- 2) El nivel de dificultad se adaptó a mis capacidades. Encerrar en un círculo la opción correspondiente:

Inadecuadamente.	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">1</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">2</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">3</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">4</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">5</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">6</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">7</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">8</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">9</td> <td style="border: 1px solid black; width: 20px;">10</td> </tr> </table>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Adecuadamente.
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			

- 3) Marque con una X la opción que crea adecuada.


	Totalmente de acuerdo.	Indiferente.	Totalmente en desacuerdo.	No aplica.
1. Los juegos me indican mi progreso.				
2. El tiempo que estuve con los juegos me ayudo a utilizar más el brazo (afectado).				
3. Las actividades son bastantes				

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

fortalecedoras.				
4. La interacción con el juego es excelente.				
5. El juego indica cuando cometo un error.				
6. El juego indica cuando cambia el nivel de dificultad.				
7. Me gusta el ambiente del juego.				
8. El tiempo que se me indica en los juegos me es aceptable.				
9. Me califica la realización de la actividad indicada en el juego.				
10. Necesito realizar una serie de tareas para completar una actividad como por ejemplo cocinar, conducir un auto. Y esto me ayuda				
11. El juego me induce a repetir una determinada actividad como por ejemplo nadar, correr, etc. Y me parece excelente para tener mejor movilidad en mi brazo.				
12. Los sonidos que están en el juego me ayudan a cumplir el objetivo del juego.				
13. La música en el juego me ayuda a concentrarme mejor.				


III) Inmersión en el juego.

- 1) ¿Qué tan representativa es la imagen de sus extremidades (brazo, manos, etc.)? Encerrar en un círculo la opción correspondiente.



Nada representativa. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Muy representativa.

- 2) Los gráficos de los juegos. Encerrar en un círculo la opción correspondiente:



No me gustaron. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Me gustaron.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- 3) Las acciones realizadas en el juego (mover, tocar, sujetar, presionar, etc.). Encerrar en un círculo la opción correspondiente:

Sin consecuencias. → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Hay consecuencias.

- 4) El objetivo del juego es (encerrar en un círculo la opción correspondiente):

Confusos. → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Claros.

- 5) El dispositivo sigue mi movimiento. Encerrar en un círculo la opción correspondiente:

No lo sigue. → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Fielmente.

- 6) El juego para utilizarlo es (encerrar en un círculo la opción correspondiente):

Complicado. → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Trivial.

IV) Interés.

- 1) La atención al juego, en la escala de -5 a 5 la puntuación más alta será la mejor evaluación. Marque con una X la opción que crea adecuada.

	5		5		5
	4		4		4
	3		3		3
	2		2		2
	1		1		1
Me ayuda a olvidarme de la terapia.	0	Me es entretenido	0	Interés por cumplir el objetivo de la tarea.	0
	-1		-1		-1
	-2		-2		-2
	-3		-3		-3
	-4		-4		-4
	-5		-5		-5

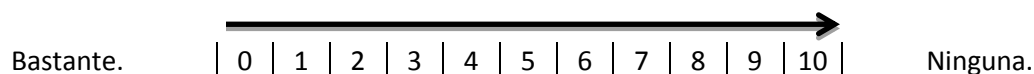
- 2) Seleccione la opción adecuada que tan “de acuerdo” esta, de las siguientes afirmaciones. Marque con una X la opción que crea adecuada.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

	Totalmente de acuerdo.	Indiferente.	Totalmente en desacuerdo.	No aplica.
1. Facilita la recuperación.				
2. Es un excelente complemento en la terapia.				
3. No me produce ningún malestar físico al realizar la actividad.				

V) Autosuficiencia

- 1) ¿Necesito de ayuda para cumplir las tareas de los juegos? Encerrar en un círculo la opción correspondiente.



VI) Tolerancia.

Marque con una X la opción que crea adecuada						
	1	2	3	4	5	
1. No voy a utilizar los juegos.						Me gustaría un poco más el juego.
2. Pierdo mi tiempo en ellos.						Vale la pena invertir tiempo en él.
3. No me gustó.						Me gustó el juego para ejercitar el brazo.

VII) Compromiso

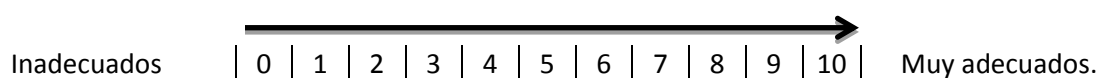
Marcar con una X la opción que corresponda.

	Totalmente de acuerdo.	Indiferente.	Totalmente en desacuerdo.	No aplica.
1. La sesión terapéutica fue breve y amena. Podría utilizar los juegos por más tiempo.				
2. Puedo cumplir el tiempo que se me indica.				
3. Terminé las actividades que se indican en el juego satisfactoriamente.				

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

VIII) Rango de movimientos.

1) El movimiento en los juegos me parecen:



IX) Tipo de movimientos cubiertos y Compensación de movimientos.

1) Seleccione la opción indicada. Marcar con una X.

	Si	No	No Aplica
1. Cubre movimientos unidireccionales como: arriba/abajo e izquierda/derecha.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Cubre movimientos omnidireccionales como la combinación de movimientos unidireccionales.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Incluye movimientos complejos unimanuales como: colocar objetos de un lugar a otro, sujetar objetos, entre otros.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Incluye movimientos complejos que requieren coordinación bimanual (utilizar las dos manos).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. La realización de las tareas de los juegos requiere la memorización de ciertos movimientos.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Detecta la compensación (utilizar otra extensión o parte del cuerpo para cumplir una tarea en lugar de la extremidad afectada) de los movimientos cuando estoy utilizando el tronco del cuerpo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

X) Significancia de los juegos.

1) Marque con una X la opción que crea adecuada.

Para usted la actividad fue:						
	1	2	3	4	5	
1. Tediosa.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Entretenida.
2. No se asemeja a la realidad.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Se asemeja bastante a la realidad.
3. Monótona.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dinámica.
4. Inadecuada.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Adecuada.
5. Irrelevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Relevante.
6. Inhabitual	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Habitual.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Sugerencias.

Apéndice 3. Relación entre preguntas y categorías a evaluar.

PREGUNTA	CRITERIO ASOCIADO
2.1. Las actividades que se realizaron en los juegos fueron: Muy difícil (-), Fácil (+). Sesión.	Nivel de capacidad.
2.2. El nivel de dificultad se adaptó a mis capacidades. Inadecuadamente (-), Adecuadamente (+).Sesión.	Nivel de capacidad
2.3.1. Los juegos me indican mi progreso. Sesión.	Retroalimentación adecuada.
2.3.2. El tiempo que estuve con los juegos me ayudo a utilizar más el brazo (afectado). Sesión.	Duración.
2.3.3. Las actividades son bastantes fortalecedoras. Sesión.	Intensidad, frecuencia y repetición.
2.3.4. La interacción con el juego es excelente. Sesión.	Retroalimentación adecuada.
2.3.5 El juego indica cuando cometo un error. Sesión.	Retroalimentación adecuada
2.3.6. El juego indica cuando cambia el nivel de dificultad. Sesión.	Retroalimentación adecuada.
2.3.7. Me gusta el ambiente del juego. Sesión.	Retroalimentación adecuada.
2.3.8. El tiempo que se me indica en los juegos me es aceptable. Sesión.	Duración.
2.3.9. Me califica la realización de la actividad indicada en el juego. Sesión.	Retroalimentación adecuada.
2.3.10. Necesito realizar una serie de tareas para completar una actividad como por ejemplo cocinar, conducir un auto. Y esto me ayuda. Sesión.	Tareas.
2.3.11. El juego me induce a repetir una determinada actividad como por ejemplo nadar, correr, etc. Y me parece excelente para tener mejor movilidad en mi brazo. Sesión.	Tareas.
2.3.12. Los sonidos que están en el juego me ayudan a cumplir el objetivo del juego. Sesión.	Retroalimentación.
2.3.13. La música en el juego me ayuda a concentrarme mejor. Sesión.	Retroalimentación.
3.1. ¿Qué tan representativa es la imagen de sus extremidades (brazo, manos, etc.)? Nada	Representación de sí mismo.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

representativa (-), Muy representativa (+). Inmersión.	
3.2. Los gráficos de los juegos. No me gustaron (-), Me gustaron (+). Inmersión.	Interfaz simple y objetivos claros.
3.3. Las acciones realizadas en el juego (mover, tocar, sujetar, presionar, etc.). Sin consecuencias (-), Hay consecuencias (+). Inmersión.	Sentimiento de control.
3.4. El objetivo del juego es: Confuso (-), Claro (+). Inmersión.	Interfaz y objetivos claros.
3.5. El dispositivo sigue mi movimiento. No lo sigue (-), Fielmente (+). Inmersión.	Representación de sus movimientos en el juego.
3.6. El juego para utilizarlo es: Complicado (-), Trivial (+). Inmersión.	Interfaz simple y objetivos claros.
4.1.1. Me ayuda a olvidarme de la terapia. Interés.	Interés.
4.1.2. Me es entretenido. Interés.	Interés.
4.1.3. Interés por cumplir el objetivo de la tarea. Interés.	Cumplimiento / compromiso, interés.
4.2.1. Facilita la recuperación. Interés.	Interés, Tolerancia.
4.2.2. Es un excelente complemento en la terapia. Interés.	Tolerancia.
4.2.3. No me produce ningún malestar físico al realizar la actividad. Interés.	Tolerancia.
5.1. ¿Necesito de ayuda para cumplir las tareas de los juegos? Bastante (-), Ninguna (+). Autosuficiencia.	Autosuficiencia.
6.1. No voy a utilizar los juegos (-). Me gustaría un poco más el juego (+). Tolerancia.	Tolerancia.
6.2. Pierdo mi tiempo en ellos (-). Vale la pena invertir tiempo en él (+). Tolerancia.	Tolerancia.
6.3. No me gustó (-). Me gustó el juego para ejercitar el brazo (+). Tolerancia.	Tolerancia.
7.1. La sesión terapéutica fue breve y amena. Podría utilizar los juegos por más tiempo. Compromiso.	Cumplimiento / compromiso.
7.2. Puedo cumplir el tiempo que se me indica. Compromiso.	Cumplimiento / compromiso.
7.3. Terminé las actividades que se indican en el juego satisfactoriamente. Compromiso.	Cumplimiento / compromiso
8.1. El movimiento en los juegos me parecen. Inadecuados (-), Adecuados (+). Rango de movimientos.	Rango de movimiento.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

9.1.1. Cubre movimientos unidireccionales como: arriba/abajo e izquierda/derecha. Cubrimiento y compensación de movimientos.	Tipo de movimientos cubiertos.
9.1.2. Cubre movimientos omnidireccionales como la combinación de movimientos unidireccionales. Cubrimiento y compensación de movimientos.	Tipo de movimientos cubiertos.
9.1.3. Incluye movimientos complejos unimanuales como: colocar objetos de un lugar a otro, sujetar objetos, entre otros. Cubrimiento y compensación de movimientos.	Tipo de movimientos cubiertos.
9.1.4. Incluye movimientos complejos que requieren coordinación bimanual (utilizar las dos manos). Cubrimiento y compensación de movimientos.	Tipo de movimientos cubiertos.
9.1.5. La realización de las tareas de los juegos requiere la memorización de ciertos movimientos. Cubrimiento y compensación de movimientos.	Tipo de movimientos cubiertos.
9.1.6. Detecta la compensación (utilizar otra extensión o parte del cuerpo para cumplir una tarea en lugar de la extremidad afectada) de los movimientos cuando estoy utilizando el tronco del cuerpo. Cubrimiento y compensación de movimientos.	Reducción de compensación de movimiento.
10.1.1. Para usted la actividad fue: Tediosa (-). Entretenida (+). Significancia de los juegos.	Tolerancia
10.1.2. Para usted la actividad fue: No se asemeja a la realidad (-). Significancia de los juegos.	Actividad de la vida cotidiana.
10.1.3. Para usted la actividad fue: Monótona (-). Dinámica (+). Significancia de los juegos.	Actividad funcional.
10.1.4. Para usted la actividad fue: Inadecuada (-). Adecuada (+). Significancia de los juegos.	Sentido o tareas significativas.
10.1.5. Para usted la actividad fue: Irrelevante (-). Relevante (+). Significancia de los juegos.	Sentido o tareas significativas
10.1.6. Para usted la actividad fue: Inhabitual (-). Habitual (+). Significancia de los juegos	Actividad de la vida cotidiana.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

Apéndice 4. Hoja de información.

Nombre del experimento: Gesture Experiment.

Investigadores Principales: Dr. Luis Enrique Sucar Succar, Dr. Felipe Orihuela-Espina, Dr. Manuel Martin Ortiz.

Investigador de Laboratorio: Juan Manuel Oropeza Salas.

La terapia de Gestos es una idea innovadora para la rehabilitación motora después de un infarto cerebral. Aquí se emplean juegos los cuales consideran actividades de la vida cotidiana y así a la persona no le sea fastidiosa la sesión. Estos juegos se deben de cubrir necesidades distintas a los juegos comerciales. Es por eso que deben de tener ciertas particularidades las cuales cubran las necesidades hacia el tipo de individuos que pretendemos enfocarnos. Estos criterios son aún tema de discusión en la comunidad científica. El desarrollo de juegos de rehabilitación es aún tema de investigación. El presente estudio busca establecer un marco que delimite unos criterios necesarios para que los juegos que se desarrollen con el objetivo de ser utilizados en rehabilitación cumplan con los requisitos clínicos necesarios. Durante el experimento se expondrá a la persona a un número de juegos y se le pedirá su retroalimentación mediante un cuestionario.

Lo que se pretende evaluar es:

- i. Que el cuestionario es válido para discriminar lo apropiado de nuevos juegos que son utilizados en rehabilitación.
- ii. Que tanto pueden impactar los juegos en el tratamiento de los individuos, así como la aceptación de ellos como una herramienta más en su rehabilitación.

Los experimentos que llevamos a cabo se pretenden rechazar o aceptar los criterios propuestos como una guía para el diseño de juegos orientados al interés de personas adultas sanas, así como evaluar un conjunto inicial de juegos.

¿Cómo se va a medir el efecto?

A través de las escalas desarrolladas a partir de los criterios encontrados en la literatura científica relevante. Se adaptarán estas a nuestros criterios que se están proponiendo dentro de la tesis.

¿Cuáles son las características a analizar?

Se pretende evaluar el apego de los juegos desarrollados a los criterios propuestos. Además se incluye una comparación con un juego comercial que ha sido utilizado con anterioridad en la rehabilitación de la motricidad y que sirve como referencia.

¿Qué factores afectan las características como motivación, movimientos y las actividades que se establecen en los juegos, las cuales se van analizar?

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

- Heterogeneidad en el tamaño y localización del infarto cerebral. No obstante este primer experimento se desarrolla sobre personas sanas sin discapacidades motrices.
- Edad y género. No obstante estos criterios no serán tenidos en cuenta como covariables en el análisis.
- El lugar donde se lleve el experimento no sea adecuado, es decir, que no tenga las condiciones ideales como: un lugar correctamente acondicionado, ausencia de distracciones para las personas durante la ejecución del experimento.

FACTORES A ESTUDIAR.

Los factores que se pretenden estudiar en este experimento son los siguientes:

- Validar los criterios que se están proponiendo que tanto sirven como punto de referencia para el diseño de juegos enfocados en la rehabilitación.
- Verificar que las características de los juegos implementados para su emplearse en rehabilitación se adaptan a los criterios propuestos.
- Evaluar cuál fue el impacto causado en los sujetos.
- Examinar si los juegos diseñados se adecuan a los criterios y hacer una comparación con los juegos comerciales genéricos y otro orientado a la rehabilitación los cuales ya están utilizándose en rehabilitación.
- Cotejar si determinados juegos lúdicos (*Pong*) se puede adaptar a la rehabilitación en base a las características que debe de tener uno que esta direccionado hacia la terapia.

OBJETIVO DEL EXPERIMENTO.

Lo que se pretende es:

- III. Evaluar un marco teórico propuesto para auxiliar en el desarrollo de juegos que se enfoquen a la rehabilitación motora de sujetos que hayan tenido problemas cerebro-vasculares.
 4. Que los principios que estamos dando se pueden adaptar para el diseño de juegos enfocados a la rehabilitación.
 5. Observar que tanto un juego que ya se está aplicando con personas que han sufrido problemas cerebro-vasculares que tanto se adecúa a nuestros criterios.
 6. Validar el cuestionario que evalúa la adherencia a los criterios de rehabilitación en base a una comparación entre jugos comerciales lúdicos y de rehabilitación.
- IV. Evaluar la adherencia a estos criterios de un paquete de juegos de desarrollo propio.
 2. Si en base a la propuesta se pueda observar que juegos lúdicos sean adaptables para uso en rehabilitación.

Diseño de un ambiente virtual orientado a la rehabilitación de las extremidades superiores.

ACTIVIDADES.

- 1) Se espera incorporar a 20 personas al experimento para la evaluación de los juegos. Durante el reclutado, a cada sujeto se le citará en un horario determinado y se le proveerá de la dirección del laboratorio donde se llevará a cabo el experimento.
- 2) A su llegada al laboratorio se le proveerá de una hoja informativa sobre el experimento. Se le dará el tiempo que requiera para su lectura, y posteriormente se le solicitará si procede que firme una hoja de consentimiento de participación en el experimento.
- 3) Cada sujeto jugará todos los juegos en un conjunto de 5 juegos incluyendo:
 - Un juego comercial adaptado para la rehabilitación (*Pong*).
 - Un juego que ya está en el mercado y que se utiliza para la rehabilitación de personas con ictus (*Egg cracking*, *Hocoma*).
 - Tres juegos prototipo que se desarrollaron bajo este proyecto: *Fly Killers*, *Steak* y *Clean Window*.

El orden de ejecución de los juegos será aleatorio variando entre distintos sujetos. Tras una mínima explicación del objetivo del juego por parte del investigador, cada juego será jugado durante **3 minutos**.

ID	JUEGO
01	Pong.
02	Egg cracking.
03	Steak (Carne).
04	Fly Killers (Insecticida).
05	Clean Window (Limpiar ventana).

- 4) Tras jugar cada uno de los juegos, se le solicitará al sujeto que rellene un cuestionario preparado al efecto para evaluar las características del marco propuesto.

QUE SE ESPERA DE LOS PARTICIPANTES.

1. Que permanezca durante el tiempo establecido (1 hora).
2. Completar el tiempo establecido en los juegos (3 minutos).
3. Que conteste el cuestionario honestamente.

PRIVACIDAD.

Una vez que el sujeto consienta participar en el experimento, se le asignará un identificador numérico (ID) por el cuál será después reconocido. Solo el investigador tendrá acceso al nombre del sujeto. En ningún momento el sujeto podrá ser identificado si no es por su identificador. Esto aplica tanto al análisis como en las publicaciones que se deriven de esta investigación.

