

Rehabilitación de miembro superior con ambientes virtuales: revisión

D.E. Guzmán¹, J. Londoño²

¹Grupo GITA, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca - Estudiante Maestría en Automática, Universidad del Cauca.

²Departamento de Fisioterapia, Universidad del Cauca.

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de un proceso de revisión bibliográfica sobre rehabilitación de miembro superior basada en ambientes virtuales. El estudio parte de los siguientes interrogantes sobre el estado actual del conocimiento en el área mencionada: ¿cómo inciden los entornos virtuales frente a la rehabilitación tradicional?, ¿qué métricas de desempeño se han aplicado en la rehabilitación virtual de miembro superior? y ¿qué dispositivos hardware se utilizan en rehabilitación virtual?. Para responder las anteriores preguntas se realizó una búsqueda de artículos científicos en el motor de búsqueda *Google Scholar* y en las bases de datos *PubMed*, *HINARI*, *ProQuest* y *Science Direct*. De la revisión realizada se concluyó que pese a la existencia de decenas de índices de desempeño para cuantificar la habilidad motriz, no existen criterios para seleccionar el índice que mejor se adapta a los objetivos de un determinado proceso de rehabilitación.

Palabras clave: Robótica, Rehabilitación motriz, Entornos virtuales

Correspondencia:

Diego Enrique Guzmán V.

Dirección: Calle 5 # 3 85, Popayán, Cauca, Colombia

Correo electrónico: diego.guzman.v@uniautonoma.edu.co

Fecha de recepción:

7 de diciembre de 2015

Fecha de aceptación:

5 de agosto de 2016

ABSTRACT

This article gives the results of a literature review process about upper limb rehabilitation based on virtual environments. The study borns of the following questions about the current state of knowledge in this subject: how virtual environments influence traditional rehabilitation?, Which performance metrics have been applied in upper limb virtual rehabilitation? and which hardware devices are used in virtual rehabilitation? To answer the above questions a search for scientific articles was made in the search engine *Google Scholar* and databases *PubMed*, *HINARI*, *ProQuest* and *Science Direct*. The conducted review concluded that despite the existence of dozens of performance indicators to quantify the driving ability, there are no criteria to select a better index that best suits the objectives of a rehabilitation process.

Keywords: robotic, motriz rehabilitation, virtual environments

INTRODUCCIÓN

La enfermedad cerebrovascular ECV es un grupo heterogéneo de condiciones patológicas cuya característica común es la alteración focal del tejido cerebral por un desequilibrio entre el aporte y los requerimientos de oxígeno y otros substratos. Incluye también los procesos de naturaleza hemorrágica (1) y constituye un problema de salud a nivel mundial (2). En la mayoría de países son la segunda o tercera causa de muerte y uno de los principales factores de origen de discapacidad en adultos (3). Un elevado porcentaje de quienes sobreviven a las ECV desarrollan parálisis y experimentan secuelas neurológicas permanentes que afectan la calidad de vida (4).

Para el año 2020 el envejecimiento de la población mayor de 65 años crecerá el 20% en 13 países desarrollados y se extenderá a 34% para el año 2030 (5). En las próximas cuatro décadas se espera que la población mayor de 60 años se incremente en un 50%, desde los 274 millones de personas en 2011 a los 418 millones que se prevé en 2050 (6), por lo que las enfermedades relacionadas con la edad, representarán la mayor causa de discapacidad permanente en países industrializados. En

Latinoamérica más del 25% de la población con discapacidad son niños y adolescentes, y solo del 2% al 3% de esta población tiene acceso a los programas y servicios de rehabilitación (7).

Para disminuir los efectos de las ECV se realiza un proceso de rehabilitación y es bien sabido que la terapia es más efectiva si se hace con prontitud luego de ocurrida la ECV (8). Algunos estudios sugieren que el entrenamiento repetitivo y de larga duración usando interfaces hombre-maquina y realidad virtual ayudan a la recuperación física y funcional (9). Los sistemas computacionales inciden de modo significativo en al menos dos aspectos. El primero, es servir como medio para la realización de ejercicios donde el uso de entornos virtuales genera apoyo a los procedimientos convencionales de tratamiento haciéndolos eficaces y eficientes (10) y el segundo es el almacenamiento y administración de información sobre el paciente, su cuadro patológico y su evolución durante el proceso de rehabilitación. El éxito de los procesos de rehabilitación motriz está determinado por tres factores: la intervención temprana, la realización de ejercicios orientados a la ejecución de tareas y la frecuencia e

intensidad con que estos se realicen (11).

Tendiendo en cuenta el problema que representa el incremento en la población de la tercera edad y dada la importancia de los ambientes virtuales en rehabilitación, esta revisión presenta en la primera sección una conceptualización sobre rehabilitación virtual, en la siguiente sección se habla sobre la ingeniería de rehabilitación y a su vez se presenta la incidencia de los entornos virtuales, las métricas de desempeño, los dispositivos hardware utilizados, aspectos de arquitectura para desarrollo de ambientes virtuales y tendencias. Finalmente se presenta una discusión y las conclusiones.

CONCEPTO DE REHABILITACIÓN VIRTUAL

Rehabilitación

Según la Real Academia Española la rehabilitación es un 'Conjunto de métodos que tiene por finalidad la recuperación de una actividad o función perdida o disminuida por traumatismo o enfermedad' (12). La rehabilitación es un proceso complejo y continuo de duración limitada que resulta de muchos procedimientos para lograr que el individuo recupere su estado funcional. Por su parte la Organización Mundial de la Salud define: 'la rehabilitación y la habilitación son procesos destinados a permitir que las personas con discapacidad alcancen y mantengan un nivel óptimo de desempeño físico, sensorial, intelectual, psicológico y/o social. La rehabilitación abarca un amplio abanico de actividades, como atención médica de rehabilitación, fisioterapia, psicoterapia, terapia del lenguaje, terapia ocupacional y servicios de apoyo' (13).

Estudios indican que la terapia intensiva y basada en ejercicios de tareas contribuyen significativamente a la recuperación motora (14). El lector interesado en

profundizar en la relación entre el aprendizaje motor y la recuperación después de una ECV puede remitirse al trabajo de Krakauer (15).

Una de las áreas de interés en la rehabilitación es la rehabilitación motriz, que busca mejorar funciones que se han perdido o se han visto disminuidas a causa de alguna lesión o patología (16). La pérdida motriz que generalmente es caracterizada por alteraciones en las funciones del cuerpo, que interfieren en el movimiento y/o locomoción de las personas. Existen varios tipos de rehabilitación: física, sensorial, cognitiva, musicoterapia, practica mental y rehabilitación virtual. Todos los anteriores tienen el propósito de estimular diferentes funciones mentales necesarias para la realización de secuencias motoras complejas para el desarrollo de acciones como: cocer un pantalón, pintar un cuadro o escribir.

Realidad virtual

En cuanto a la realidad virtual es importante sintetizar de las múltiples definiciones existentes de realidad virtual, una que involucre, relacione y exprese con claridad distintos aspectos, tal como: la realidad virtual es una interface de usuario avanzada para aplicaciones computacionales, que permiten al usuario navegar e interactuar, en tiempo real, con un ambiente tridimensional generado por computador, usando dispositivos multisensoriales (17).

Los ambientes virtuales han servido como medio para la realización de ejercicios de rehabilitación (18). Dichos ambientes son escenarios gráficos en los cuales el usuario interactúa en tiempo real haciendo uso de dispositivos sensoriales para visión, audición y propiocepción (19).

Ventajas de la rehabilitación virtual

De la combinación de los conceptos de realidad virtual y rehabilitación, surgió el concepto de rehabilitación virtual, este es un término acuñado inicialmente por los profesores Daniel Thalmann y Grigore Burdea (20). La rehabilitación virtual se define como el entrenamiento basado en ejercicios de simulación mediante tecnología de realidad virtual (21).

La rehabilitación virtual también ofrece la capacidad de individualizar las necesidades de tratamiento, mientras que proporciona una mayor estandarización de los protocolos de evaluación y capacitación. De hecho, la evidencia preliminar indica que la realidad virtual ofrece un medio único en el que la terapia puede ser proporcionada dentro de un contexto funcional, útil y motivador, donde se puede clasificar y documentar los resultados fácilmente (22).

En el año 2010, Mundy y Hiller (23) publicaron un estudio gubernamental en Australia acerca de las mejoras motrices en pacientes con ECV y concluyeron que la rehabilitación virtual permite intensificar el tratamiento sin la presencia constante de los terapeutas y además resaltan la disminución de los costos. Por otro lado dos revisiones sistemáticas realizadas en el año 2011 por Lavert et al. (24) y Saposnik et al. (25), mostraron una mejoría en la motricidad de la extremidad superior y la calidad de vida de los pacientes con ECV, Sin embargo, algunos de los autores destacan que las medidas utilizadas para medir los resultados son muy variables y el consecuente número limitado de estudios, además que no se evalúan otros aspectos como la motivación, la participación y la calidad de vida de las personas, lo cual puede producir un sesgo en los resultados.

Y en el año 2015 Viñas-Diz y Sobrido-Prieto (26) publicaron una revisión sistemática sobre la realidad virtual con

finés terapéuticos en pacientes con ECV donde concluyen que los sistemas de realidad virtual más utilizados en la intervención de las alteraciones motoras en pacientes con ECV son los sistemas semiinmersivos o no inmersivos, que la ECV es la patología neurológica que más se interviene con la realidad virtual, además, los artículos analizados presentan un nivel de evidencia y un grado de recomendación óptimo, pero se necesitan estudios con tamaños de muestra más grandes para llegar a conclusiones más veraces y robustas.

INGENIERÍA EN LA REHABILITACIÓN

Incidencia de la rehabilitación virtual frente a la tradicional

Durante la rehabilitación tradicional el sujeto hace uso de sus sentidos para tener una 'realimentación' de las tareas que realiza, a través de los ojos, de los sentidos, audición y tacto, por lo que el mundo virtual debe emular dichas situaciones. Al mover un anillo metálico alrededor de un alambre se analizó el desempeño de dos grupos de participantes, el primer grupo entrenado en un ambiente virtual y el segundo en un sistema real. El porcentaje de errores cometidos por cada grupo fue similar a pesar de que la prueba final se desarrolló sobre el sistema real. Por lo que se afirma según estos resultados que las habilidades adquiridas en un entorno virtual pueden ser transferidas al mundo real. La ventaja del entrenamiento virtual se pone en evidencia cuando durante el desarrollo del ejercicio los participantes son perturbados con interferencia tanto motora como cognitiva, en tal caso, el desempeño del primer grupo (los entrenados virtualmente) fue superior (27).

Existe muchas formas de aumentar la realimentación al sujeto durante el entrenamiento de una tarea motora, cuando

se remueve la realimentación los sujetos no pueden repetir con el mismo desempeño la tarea en el mundo real. Por ejemplo se comparó con tenis de mesa el entrenamiento virtual y el real, la realimentación permitió a los sujetos centrarse en el detalle de los movimientos más relevantes para realizar la tarea y al comparar su desempeño en la tarea en el mundo real mostró que la práctica sirvió de base, sin embargo al remover un componente del ambiente virtual no mostró transferencia al mundo real (28).

Los efectos de la realidad virtual y la tecnología háptica usando juegos en computador, mostraron un cambio positivo de actitud en los usuarios. Se utilizó para la rehabilitación de un grupo de 29 pacientes, 17 mujeres y 12 hombres con edades entre 44 y 85 años. La rehabilitación se inició entre el primer mes y 140 meses después del evento cerebro-vascular y mejora tanto las habilidades cognitivas como las motoras (29).

El sistema de rehabilitación virtual de propiocepción fue desarrollado para pacientes con ECV para usar realimentación propioceptiva en rehabilitación en rehabilitación de miembro superior bloqueando la realimentación visual. Para evaluar su efecto terapéutico, 10 pacientes con ECV mayor a 3 meses, entrenados con rehabilitación con realimentación de propiocepción por una semana y con realimentación visual por otra semana en orden aleatorio. Las funciones de propiocepción se prueban antes, después y al final de la formación. De los resultados se muestra la efectividad y posible uso de los entornos virtuales para recobrar la propiocepción en pacientes con ictus (30).

La comparación de un programa de rehabilitación clásico con uno basado en realidad virtual en el caso de pacientes con dificultades de movilidad en el hombro, mostró que la rehabilitación virtual es

una buena alternativa para los pacientes ambulatorios o domiciliarios y en otros campos podría usarse en aplicaciones de telesalud (31); Es otro caso que demuestra la posibilidad de transferir las habilidades adquiridas en el mundo virtual al mundo real.

Medidas de desempeño

Las medidas de desempeño son una parte fundamental de la rehabilitación, es necesario conocer que directrices clínicas y organismos profesionales establecen los estándar de medida que deben ser usados (32), aunque se debe tener presente que las guías no proveen una respuesta a toda situación y no pueden remplazar un buen juicio clínico. Las directrices clínicas son aplicables a un 80 % de situaciones clínicas el 80 % del tiempo (33), en consecuencia, muchos investigadores y profesionales de la salud no están seguros de cual usar (34).

En el contexto clínico información detallada de la actividad y limitaciones físicas son necesarias para determinar problemas, monitorear el progreso y un plan de tratamientos. Muchas medidas para la evaluación de la función motora de miembro superior después de una ECV han sido propuestas en las últimas décadas (35–38) y en en otras considerando múltiples condiciones (39). También hay medidas genéricas que se aplican a todo el cuerpo como la resistencia o el rango de movimiento y las medidas de subluxación del hombro o ataxia.

La recuperación después de la ECV se mide en términos de la actividad diaria, sin embargo una medición del control de movimiento también es necesaria con una prueba simple (*Fitts reaching test*) de la función de la extremidad superior basado en la tarea usada por Fitts y Peterson (40), la cual predice el tiempo necesario para moverse rápidamente desde una posición inicial hasta

una zona destino final como una función de la distancia hasta el objetivo y el tamaño de éste.

El *Reaching Performance Scale (RPS)*, propone una nueva escala de rendimiento, para evaluar los movimientos compensatorios en las extremidades superiores en personas con hemiparesia secundaria a ECV (41).

La *observación de movimientos de miembro superior*, durante un estudio se confrontó los juicios visuales de los fisioterapeutas acerca de las características cinemáticas de los movimientos del miembro superior de personas sin alteraciones neurológicas y personas con ECV, el ejercicio era una tarea de transportar, el criterio se centró en la velocidad del movimiento, sacudidas y trayectoria indirecta de la mano (42).

El *Franchay arm test* se verificó en pacientes con hasta 64 semanas después del ECV para el retorno del movimiento del brazo, el procedimiento de evaluación emplea unas pruebas que evalúa principios de control de movimiento del sistema nervioso central, la prueba puede ser por personal no capacitado y proporciona una guía para el diagnóstico y dedicación de tiempo adecuado para la terapia física en general (43).

El *Box and Block Test* es una prueba de destreza manual, usada por terapeutas profesionales para evaluar los individuos con discapacidades físicas, debido a que carece de datos normativos, los resultados deben ser interpretados subjetivamente (44).

Dispositivos utilizados

El reconocimiento de los gestos de los usuarios puede hacerse teniendo controles físicos o no físicos: En el primer caso interfaces hápticas, guantes mecánicos y trajes con sensores (45, 46), este tipo de interfaces

tiene una alta precisión y no requiere procesos computacionales adicionales, pues la posición y la dirección es tomada de los sensores en el dispositivo. Por otro lado tenemos los sistemas de visión basados por ejemplo en la tecnología de Microsoft Kinect (47) cuyo funcionamiento se basa totalmente en la información obtenida por las cámaras, aunque algunos como el control de movimiento de Sony (48) aun requiere interfaces hápticas para los movimientos del usuario.

Hoy día existe un gran número de dispositivos hápticos en el mercado, los hay de dos tipos: controlados por impedancia y controlados por admitancia. Un dispositivo háptico de alto rendimiento ha sido desarrollado por FCS Control Systems el *Haptic Master* (49), siendo el *Haptic Master* del tipo controlado por impedancia y siendo por ello ligero (50). Al mover el usuario el dispositivo háptico, el dispositivo retornará una fuerza sí se está en contacto con un objeto virtual (51).

Sin embargo las interfaces hápticas son limitadas en usabilidad, portabilidad y adaptabilidad haciéndolas costosas y obsoletas (52), adicionalmente no son recomendadas en rehabilitación pues limitan los movimientos del paciente (53). En otros contextos, por ejemplo en juegos de simulación, el uso de controles que provean realimentación al usuario es recomendable.

En cuanto a proyectos relacionados con dispositivos de visión se tienen ambientes virtuales interactivos para rehabilitación de ECV basado en el sistema Kinect, un robot humanoide y dispositivos de medición de señales ergonómicas (54), las rutinas de rehabilitación hechas por especialistas, se presentan al paciente dentro del entorno. El paciente realiza las tareas de rehabilitación, mientras su avatar realiza los mismos gestos capturados con el sistema de visión Kinect.

La información del movimiento del paciente y las señales obtenidas por los dispositivos de medida ergonómicos, son usados para evaluar el progreso en la rehabilitación. Estos ambientes son diseñados para crear una influencia positiva en el proceso de rehabilitación, reducir costos y aumentar el compromiso del paciente (55,56).

Cuando el paciente ha perdido gran parte de la movilidad del miembro superior, es necesario realizar un procedimiento asistido y soportado por robots, comparada a la rehabilitación manual, el entrenamiento con robots puede ser más intenso, de mayor duración, repetitivo y orientado a tareas (57). Algunos dispositivos interesantes a mencionar son:

- El dispositivo iPAM es un sistema de brazo robótico con actuadores neumáticos, es semi-automatizado y proporciona ejercicios de extremidades superiores para personas con pérdida funcional. El sistema emula la asistencia de un fisioterapeuta, entre sus características está que compensa la gravedad y elimina cualquier carga potencialmente peligrosa para el paciente (58). La realimentación del paciente en cuanto a desempeño, usabilidad en el ejercicio y motivación fueron claves para el despliegue exitoso del sistema iPAM (59).
- El MIT-MANUS nació como una investigación para el desarrollo de una aplicación de la robótica como ayuda en la terapia neurológica y en particular una herramienta para terapeutas. El objetivo era lograr un dispositivo clínico interactivo y con un diseño que permitiera no solo evaluar pacientes, sino también la terapia con significativa participación (vídeo juegos) (60).
- El ARMEO es otro sistema de rehabilitación de miembro superior eficaz para la rehabilitación de miembro superior en pacientes con disminución de movimiento (sin llegar a la parálisis) debida a un ECV (61).
- El sistema REOGO está diseñado para proveer terapia robotizada para las víctimas de ECV, el objetivo era hacer una herramienta que cuantificara un diagnóstico como también monitorear la terapia de la víctima (62). El sistema REOGO fue diseñado para ser de bajo costo y portable para incrementar el acceso a la rehabilitación de miembro superior (63).
- El dispositivo de rehabilitación de brazo PuParm, bajo los requisitos de ser sencillo y modular, ofrece una terapia capaz de aumentar la motivación y compromiso de los pacientes con la terapia y evaluar el progreso del punto de vista funcional (64,65).

Tendencias

En el campo de los entornos virtuales, en cuanto a los serious games es importante mantener la atención del usuario en la rehabilitación, por lo que tener una adaptación dinámica de los escenarios y desafíos de un juego a las habilidades individuales de un jugador, puede resultar útil para incrementar la jugabilidad, gestionar y adecuar la dificultad al jugador y optimizar los recursos visuales en pantalla (66).

Pero los sistemas virtuales de rehabilitación no se limitan a la motricidad por ECV, también es importante resaltar su uso para otro tipo de enfermedades específicas como lo es Parkinson. Para la terapia física es necesario sistemas de bajo costo,

configurables y con captura de movimiento, para centrarse en las directrices para el diseño de juegos serios en rehabilitación motora como lo es la enfermedad del Parkinson (67). En el caso de la parálisis cerebral se ha analizado y estudiado el caso de un niño de 7 años al que se sometió a un protocolo de terapia de 12 a 45 minutos, dos veces por semana, a través del dispositivo Kinect, que permite seguir y reproducir los movimientos del cuerpo en la pantalla. Aquí se evidencia que usar la realidad virtual como una herramienta prometedora que se puede incorporar en procesos de rehabilitación de pacientes con disfunciones neuromotoras (68).

Sistemas de reconocimiento de intención de movimiento con señales electromiográficas, buscan aportar mayor nivel de inmersión en el sistema de rehabilitación virtual, aunque el reto se centra principalmente en la extracción de características de las señales, más que la técnica de clasificación en sí misma e identificar correctamente el estado de presión (69).

Por otro lado, al lograr un reconocimiento fiable con un pensamiento consciente como el de mover el brazo y accionar un mecanismo por medio de la transformación y transmisión de una señal, es posible desarrollar exoesqueletos más simples, de menor costo y con mayores funciones y grados de libertad (70).

DISCUSIÓN

En este artículo se presentó el estado actual de los entornos virtuales para rehabilitación de miembro superior, la relación entre los entornos virtuales y las técnicas tradicionales, las medidas de desempeño para medir cuantitativa o cualitativamente al paciente, los dispositivos de control más comunes para usar estos sistemas, algunos sistemas robotizados para

asistir la rehabilitación, aspectos relacionados al software y las tendencias o estudios relevantes de los últimos años.

También se evidenció, en cuanto a los ejercicios de rehabilitación, que estos pueden ser actividades repetitivas o juegos serios enfocados a tareas de la vida diaria, siendo estos últimos más relevantes en el proceso de rehabilitación.

Se presentaron también algunas medidas de desempeño para evaluar la recuperación del paciente, pero estas no hacen parte de una norma o guía clínica por lo que su uso aún depende enteramente del criterio y la experiencia del fisioterapeuta. Sin embargo, estas medidas de desempeño han sido estudiadas en cuanto a su utilidad clínica sobre variables como: Tiempo para completar una tarea, costo, portabilidad y necesidad de equipo especializado. En cuanto a las propiedades psicométricas: validez, fiabilidad prueba-reprueba, fiabilidad interevaluador y habilidad para detectar cambios, en algunas medidas no se encuentra disponible sus respectivos indicadores (71).

Los resultados de esta revisión mostrarán que elegir entre interfaces hápticas o dispositivos de visión para que el paciente se relacione con el juego serio esta abierto a debate, pues cada uno tiene sus ventajas y desventajas, pero su efectividad dentro de la rehabilitación como tal no esta cuantificada.

Se observa la gran variedad en cuanto a la duración de las terapias, intensidad del tratamiento y en determinar si los efectos de la realidad virtual se mantienen a largo plazo, hay pocos estudios en los que se haga un seguimiento a largo plazo luego de aplicar la terapia de realidad virtual (26); por otro lado es importante determinar los efectos fisiológicos del porqué y cómo las terapias de realidad virtual pueden mejorar la capacidad motriz (72). Algunas investigaciones han

demostrado que para que se produzca aprendizaje y reaprendizaje motor tienen que producirse cambios en la arquitectura neuronal; para ello, la terapia tiene que basarse en la realización de actividades funcionales, repetitivas, recompensadas, y realizadas en un período largo de tiempo (73, 74).

Por otro lado es importante resaltar los efectos de la terapia de realidad virtual en las personas sanas, ya que se observa una mejoría en el resultado, en el aprendizaje y en la ejecución de la actividad motora; esto se ve evidenciado por el aumento en los procesos de retroalimentación visual, táctil y/o auditivo (75–77); esto conlleva a generar investigaciones que demuestren la eficacia de la realidad virtual en la readquisición de las actividades motoras comprometidas en un ECV. Como consecuencia de esto, se puede concebir que la explotación de la retroalimentación aumentada, (conocimiento del rendimiento y de los resultados), pueda ayudar a mejorar o facilitar las habilidades motrices alteradas. Tanto la intensidad como la dificultad en la tarea motora, pueden estimular mecanismos más eficaces de la reorganización cerebral involucrada en la restauración anatómica de las zonas lesionadas (78).

Además, la posibilidad de modificar las características del escenario virtual hace que las sesiones de rehabilitación sean más atractivas y agradables. En este contexto, los pacientes son desafiados continuamente por el cambio constante de tareas diseñadas, lo que implica una participación más activa en los ejercicios solicitados y que potencialmente puede mejorar los resultados y por ende, acelerar el proceso de recuperación. Con el tiempo, muchos pacientes aprenden a manejar el equipo de realidad virtual con poca supervisión por parte de los fisioterapeutas (79).

Es importante mencionar que algunos estudios han evidenciado la presencia de efectos secundarios por la utilización de dispositivos de realidad virtual, también conocidos como Ciber-molestias; estos trastornos pueden ser visuales, desorientación, inestabilidad postural, náuseas, dolor de cabeza, dolores posturales, entre otros, y su principal causa es una mala adecuación entre el sistema visual, el sistema vestibular y el sistema ambulatorio o postural. Estos trastornos pueden aparecer si se aumenta considerablemente el tiempo de exposición al dispositivo de realidad virtual y las características y circunstancias personales durante la experiencia; y en algunos casos las personas pueden sufrir de un efecto adaptativo a la experiencia con realidad virtual que muestra una disminución de la aparición de efectos secundarios (80).

CONCLUSIONES

Las terapias de realidad virtual son una alternativa de complemento a las terapias tradicionales permitiendo el abordaje individualizado de acuerdo a las necesidades del paciente.

En la medida que se generalice la utilización de estas terapias se puede lograr la disminución de los costos de los dispositivos hardware y/o software.

Estos procesos demuestran el trabajo mancomunado entre los diferentes profesionales en el área de la ingeniería y los profesionales del área de la salud en pro de la recuperación funcional de los pacientes con ECV.

Agradecimientos

Los autores deseamos expresar nuestra sincera gratitud a la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca y a la

Universidad del Cauca por el apoyo brindado para estos procesos de investigación.

REFERENCIAS

1. V. B. Disease, “Enfermedad cerebro vascular,” *Correo Científico Médico de Holguín*, vol. 3, no. 4, 1999.
2. C. Warlow, J. van Gijn, M. Dennis, and et al, *Stroke: Practical Management*, 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
3. WHO. (2015) World health statistics 2015. World Health Organization. [Online]. Available: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/170250/1/9789240694439_eng.pdf?ua=1&ua=1
4. D. S. Nichols-Larsen, P. Clark, A. Zeringue, A. Greenspan, and S. Blanton, “Factors influencing stroke survivors’ quality of life during subacute recovery,” *Stroke*, vol. 36, no. 7, pp. 1480–1484, 2005.
5. C. Money. (2014) World getting super-aged at scary speed. [Online]. Available: <http://money.cnn.com/2014/08/21/news/economy/aging-countries-moodys>
6. A. Graciani, M. Zuluaga-Zuluaga, J. R. Banegas, L. Leon-Munoz, J. J. de la Cruz, and F. Rodriguez-Artalejo, “[cardiovascular mortality attributable to high blood pressure in spanish population over 50].” *Medicina Clínica*, vol. 131, no. 4, pp. 125–129, 2008.
7. G. Mitchell, S. Laxe, M. Bernabeu, and R. López-Blázquez, “Aplicación de la clasificación internacional del funcionamiento, de la discapacidad y de la salud en la evaluación del paciente con secuelas de traumatismo craneoencefálico,” *Rehabilitación*, vol. 45, no. 1, pp. 49–56, 2011.
8. R. W. Teasell and L. Kalra, “What’s new in stroke rehabilitation back to basics,” *Stroke*, vol. 36, no. 2, pp. 215–217, 2005.
9. P. Weiss, D. Rand, N. Katz, and R. Kizony, “Video capture virtual reality as a flexible and effective rehabilitation tool,” *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, vol. 12, no. 1, pp. 1 – 12, 2004.
10. M. Harms, “Advancing technology in rehabilitation,” *Physiotherapy*, vol. 98, no. ISSN 00319406, pp. 181–182, 2012.
11. F. Malouin, C. Richards, B. McFayden, and J. Doyon, “Nouvelles perspectives en réadaptation motrice après un accident vasculaire cérébral,” *Medecine Sciences*, vol. 19, no. 10, pp. 994 – 998, 2003.
12. R. A. Española. (2015, Noviembre). [Online]. Available: <http://buscon.rae.es/drae/srv/search?val=rehabilitaciones>
13. O. M. de la Salud. (2015, Noviembre). [Online]. Available: <http://www.who.int/disabilities/care/es/>
14. R. W. Teasell and L. Kalra, “What’s new in stroke rehabilitation,” *Stroke*, vol. 35, no. 2, pp. 383–385, 2004.
15. J. Krakauer, “Motor learning: its relevance to stroke recovery,” *Current Opinion in Neurology*, vol. 19, no. 1, pp. 84–90, 2006.
16. M. Gorgatti and M. Bohme, “Autenticidade científica de um teste de agilidade para indivíduos em cadeira de rodas,” *Revista Paulinista de Educação Física*, vol. 17, no. 1, pp. 41–50, 2003.
17. T. Romero, C. Kirner, and S. R, *Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada*, PA, Ed. Belém, 2006.

18. S. Koenig, A. Dunser, C. Bartneck, J. Dalrymple-Alford, and G. Crucian, "International conference on virtual rehabilitation (icvr)," in *Development of Virtual Environments for Patient-Centered Rehabilitation*, 2011.
19. M. Levin, H. Sveistrup, and S. Subramanian, *Feedback and virtual environments for motor learning and rehabilitation/Rétroaction et environnement virtuel pour l'apprentissage moteur et la rééducation*, F. G. L. (Ed), Ed., 2010.
20. G. Burdea, *Key Note Address: Virtual Rehabilitation-Benefits and Challenges. First International Workshop on Virtual Rehabilitation*, 2002.
21. M. Holden, "Virtual environments for motor rehabilitation: Review," *Cyberpsychology & Behavior*, vol. 8, no. 3, pp. 187–211, 2005.
22. H. Sveistrup, "Motor rehabilitation using virtual reality," *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, pp. 1–8, 2004.
23. L. Mundy and J. Hiller, "Rehabilitation of stroke patients using virtual reality games," *Australia and New Zealand Horizon Scanning Network. Prioritising Summary*, vol. 27, Junio 2010.
24. K. E. Laver, S. George, S. Thomas, J. E. Deutsch, and M. Crotty, "Realidad virtual para la rehabilitación del accidente cerebrovascular," 2011.
25. G. Saposnik, M. Levin, S. O. R. C. S. W. Group *et al.*, "Virtual reality in stroke rehabilitation a meta-analysis and implications for clinicians," *Stroke*, vol. 42, no. 5, pp. 1380–1386, 2011.
26. S. Viñas-Diz and M. Sobrido-Prieto, "Realidad virtual con fines terapéuticos en pacientes con ictus: revisión sistemática," *Neurología*, 2015.
27. F. Rose, E. Attree, B. Brooks, D. Parslow, and P. Penn, "Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training," *Ergonomics*, vol. 43, no. 4, pp. 494–511, 2000.
28. E. Todorov, R. Shadmehr, and E. Bizzi, "Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task," *Journal of Motor Behavior*, vol. 29, no. 2, pp. 147–158, 1997.
29. J. Broeren, A. Bjorkdahl, L. Claesson, and D. Goude, "Virtual rehabilitation after stroke," *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 139, pp. 77–82, 2008.
30. S. Cho, J. Ku, Y. K. Cho, I. Y. Kim, Y. J. Kang, D. P. Jang, and S. I. Kim, "Development of virtual reality proprioceptive rehabilitation system for stroke patients," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 113, no. 1, pp. 258 – 265, 2014.
31. H. Sveistrup, J. McComas, M. Thornton, S. Marshall, H. Finestone, A. McCormick, K. Babulic, and M. A., "Experimental studies of virtual reality-delivered compared to conventional exercise programs for rehabilitation," *Cyberpsychology Behav*, vol. 6, no. 3, pp. 245–249, 2003.
32. A. O. T. Association *et al.*, "Standards of practice for occupational therapy," 2009.
33. I. S. W. Party, "National clinical guideline for stroke," 2012.
34. H. S. Lo and S. Q. Xie, "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects," *Medical Engineering & Physics*, vol. 34, no. 3, pp. 261 – 268, 2012.
35. S. Ashford, M. Slade, F. Malaprade, and L. Turner-Stokes, "Evaluation of

- functional outcome measures for the hemiparetic upper limb: a systematic review,” *Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 40, no. 10, pp. 787–795, 2008.
36. E. Croarkin, J. Danoff, and C. Barnes, “Evidence-based rating of upper-extremity motor function tests used for people following a stroke,” *Physical Therapy*, vol. 84, no. 1, pp. 62–74, 2004.
 37. K. A. Okkema and K. H. Culler, “Functional evaluation of upper extremity use following stroke: a literature review,” *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 4, no. 4, pp. 54–75, 1998.
 38. T. J. Rowland and L. Gustafsson, “Assessments of upper limb ability following stroke: a review,” *The British Journal of Occupational Therapy*, vol. 71, no. 10, pp. 427–437, 2008.
 39. L. A. Connell and S. F. Tyson, “Clinical reality of measuring upper-limb ability in neurologic conditions: A systematic review,” *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 93, no. 2, pp. 221 – 228, 2012.
 40. A. Turton and C. Fraser, “The use of a simple aiming task to measure recovery following stroke,” *Physiotherapy Theory and Practice*, vol. 3, no. 3, pp. 117–125, 1987.
 41. M. F. Levin, J. Desrosiers, D. Beauchemin, N. Bergeron, and A. Rochette, “Development and validation of a scale for rating motor compensations used for reaching in patients with hemiparesis: the reaching performance scale,” *Physical Therapy*, vol. 84, no. 1, pp. 8–22, 2004.
 42. J. Bernhardt, P. J. Bate, and T. A. Matyas, “Accuracy of observational kinematic assessment of upper-limb movements,” *Physical Therapy*, vol. 78, no. 3, pp. 259–270, 1998.
 43. L. De Souza, R. L. Hewer, and S. Miller, “Assessment of recovery of arm control in hemiplegic stroke patients. 1. arm function tests,” *Disability & Rehabilitation*, vol. 2, no. 1, pp. 3–9, 1980.
 44. V. Mathiowetz, G. Volland, N. Kashman, and K. Weber, “Adult norms for the box and block test of manual dexterity,” *American Journal of Occupational Therapy*, vol. 39, no. 6, pp. 386–391, 1985.
 45. L. Dipietro, A. M. Sabatini, and P. Dario, “Evaluation of an instrumented glove for hand-movement acquisition,” *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 40, no. 2, pp. 179–190, 2003.
 46. C. Crean, C. Mcgeouge, and R. O’kennedy, “11 - wearable biosensors for medical applications,” in *Biosensors for Medical Applications*, ser. Woodhead Publishing Series in Biomaterials, S. Higson, Ed. Woodhead Publishing, 2012, pp. 301 – 330.
 47. (2015) Microsoft kinect. [Online]. Available: <http://www.xbox.com/it-IT/Kinect?xr=shellnav>
 48. (2015) Sonny move controller. [Online]. Available: <http://us.playstation.com/ps3/accessories/playstation-move-motion-controller-ps3.html>
 49. R. Van Der Linde, P. Lammertse, E. Frederiksen, and B. Ruiters, “The hapticmaster, a new high-performance haptic interface,” in *Proceedings of Eurohaptics*, 2002.
 50. R. J. Adams and B. Hannaford, “Control law design for haptic interfaces to virtual reality,” *Control Systems Technology*,

- IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 1, pp. 3–13, 2002.
51. T. H. Massie and J. K. Salisbury, “The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects,” in *Proceedings of the ASME winter annual meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, vol. 55, no. 1. Chicago, IL, 1994, pp. 295–300.
 52. C. G. Burgar, P. S. Lum, P. C. Shor, and H. M. Van der Loos, “Development of robots for rehabilitation therapy: the palo alto va/stanford experience,” *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 37, no. 6, pp. 663–674, 2000.
 53. L. E. Kahn, P. S. Lum, W. Z. Rymer, and D. J. Reinkensmeyer, “Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does?” *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 43, no. 5, p. 619, 2006.
 54. J. M. I. Zannatha, A. J. M. Tamayo, A. D. G. Sanchez, J. E. L. Delgado, L. E. R. Cheu, and W. A. S. Arevalo, “Development of a system based on 3d vision, interactive virtual environments, ergonomic signals and a humanoid for stroke rehabilitation,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 112, no. 2, pp. 239 – 249, 2013, sI: Computer Assisted Tools for Medical Robotics.
 55. Y.-J. Chang, S.-F. Chen, and J.-D. Huang, “A kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities,” *Research in Developmental Disabilities*, vol. 32, no. 6, pp. 2566 – 2570, 2011.
 56. Y.-J. Chang, W.-Y. Han, and Y.-C. Tsai, “A kinect-based upper limb rehabilitation system to assist people with cerebral palsy,” *Research in Developmental Disabilities*, vol. 34, no. 11, pp. 3654 – 3659, 2013.
 57. T. Nef, M. Guidali, V. Klamroth-Marganska, and R. Riener, “Armin-exoskeleton robot for stroke rehabilitation,” in *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7-12, 2009, Munich, Germany*. Springer, 2009, pp. 127–130.
 58. A. Jackson, P. Culmer, S. Makower, M. Levesley, R. Richardson, A. Cozens, M. Williams, and B. Bhakta, “Initial patient testing of ipam-a robotic system for stroke rehabilitation,” in *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 250–256.
 59. S. Kemna, P. R. Culmer, A. E. Jackson, S. Makower, J. F. Gallagher, R. Holt, F. Clossen, J. A. Cozens, M. C. Levesley, and B. B. Bhakta, “Developing a user interface for the ipam stroke rehabilitation system,” in *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 879–884.
 60. H. I. Krebs, M. Ferraro, S. P. Buerger, M. J. Newbery, A. Makiyama, M. Sandmann, D. Lynch, B. T. Volpe, and N. Hogan, “Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for mit-manus,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 1, no. 1, p. 5, 2004.
 61. C. Colomer, A. Baldoví, S. Torromé, M. Navarro, B. Moliner, J. Ferri, and E. Noé, “Eficacia del sistema arneo(r)spring en la fase crónica del ictus. estudio en hemiparesias leves-moderadas,” *Neurología*, vol. 28, no. 5, pp. 261 – 267, 2013.

62. S. Faran, O. Einav, D. Yoeli, M. Kerzhner, D. Geva, G. Magnazi, S. Van Kaick, and K.-H. Mauritz, "Reo assessment to guide the reogo therapy: Reliability and validity of novel robotic scores," in *Virtual Rehabilitation International Conference, 2009*. IEEE, 2009, pp. 209–209.
63. E. C. Lu, "Development of an upper limb robotic device for stroke rehabilitation," Ph.D. dissertation, University of Toronto, 2011.
64. J. A. Díez, F. J. Badesa, R. Morales, L. L. J. Sabater, and N. García-Aracil, "Diseño de dispositivo auxiliar de rehabilitación de mano," *Neuroingeniería Biomédica*, 2014.
65. F. J. Badesa, R. Morales, N. Garcia-Aracil, J. M. Sabater, C. Perez-Vidal, and E. Fernandez, "Multimodal interfaces to improve therapeutic outcomes in robot-assisted rehabilitation," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 6, pp. 1152–1158, 2012.
66. Z. M. Osman, J. Dupire, S. Mader, P. Cubaud, and S. Natkin, "Monitoring player attention: A non-invasive measurement method applied to serious games," *Entertainment Computing*, pp.–, 2015.
67. I. T. Paraskevopoulos, E. Tseklevs, C. Craig, C. Whyatt, and J. Cosmas, "Design guidelines for developing customised serious games for parkinson's disease rehabilitation using bespoke game sensors," *Entertainment Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 413 – 424, 2014.
68. S. L. Pavão, J. L. B. Arnoni, A. K. C. de Oliveira, and N. A. C. F. Rocha, "Impact of a virtual reality-based intervention on motor performance and balance of a child with cerebral palsy: a case study*," *Revista Paulista de Pediatria (English Edition)*, vol. 32, no. 4, pp. 389 – 394, 2014.
69. F. M. Calcatelli, C. Carbajal, E. Pérez, H. Fernández, A. M. Echenique, and N. López, "Diseño de un sistema de rehabilitación para miembro superior en entorno de realidad virtual (design of a upper limb rehabilitation system in virtual reality environment/projeto do sistema de reabilitação do membro superior em ambiente de realidade virtual)," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 7, no. 14, 2014.
70. M. Zaldívar and R. Alonso, "Diseño de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior accionado por una interfaz cerebro-máquina," 2015.
71. L. A. Connell and S. F. Tyson, "Clinical reality of measuring upper-limb ability in neurologic conditions: a systematic review," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 93, no. 2, pp. 221–228, 2012.
72. F. Orihuela-Espina, I. Fernández del Castillo, L. Palafox, E. Pasaye, I. Sánchez-Villavicencio, R. Leder, J. Hernández Franco, and L. Enrique Sucar, "Neural reorganization accompanying upper limb motor rehabilitation from stroke with virtual reality-based gesture therapy," *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 20, no. 3, pp. 197–209, 2013.
73. J. M. Martínez, "Evidencia científica de los progresos en la rehabilitación de la enfermedad cerebrovascular," *Rehabilitación*, vol. 38, no. 5, pp. 246–249, 2004.
74. M. Bayón and J. Martínez, "Plasticidad cerebral inducida por algunas terapias aplicadas en el paciente con ictus," *Rehabilitación*, vol. 42, no. 2, pp. 86–91, 2008.

75. J. W. Krakauer, "Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation," *Current Opinion in Neurology*, vol. 19, no. 1, pp. 84–90, 2006.
76. S. J. Page, D. R. Gater, and P. Bach-y Rita, "Reconsidering the motor recovery plateau in stroke rehabilitation," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 85, no. 8, pp. 1377–1381, 2004.
77. C. J. Winstein, "Knowledge of results and motor learning-implications for physical therapy," *Physical Therapy*, vol. 71, no. 2, pp. 140–149, 1991.
78. R. J. Nudo, B. M. Wise, F. SiFuentes, and G. W. Milliken, "Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct," *Science*, vol. 272, no. 5269, p. 1791, 1996.
79. A. Turolla, M. Dam, L. Ventura, P. Tonin, M. Agostini, C. Zucconi, P. Kiper, A. Cagnin, and L. Piron, "Virtual reality for the rehabilitation of the upper limb motor function after stroke: a prospective controlled trial," *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, vol. 10, no. 1, p. 1, 2013.
80. B. G. Cuevas and L. V. Aguayo, "Efectos secundarios tras el uso de realidad virtual inmersiva en un videojuego," *International Journal of Psychology and Psychological Therapy*, vol. 13, no. 2, pp. 163–178, 2013.

