

El Valor Agregado de la Realidad Virtual en Tratamientos de Rehabilitación Muscular. Revisión de Literatura¹

Kelly Johanna Coronado Ahumada², Andrés Felipe Están Márquez³, Breiner Natera Panza⁴,
Ricardo Antonio de la Hoz Lara⁵, Karen Elena Salas Viloria⁶

Resumen

La realidad virtual (RV) constituye una herramienta alternativa para la rehabilitación de distintas lesiones del cuerpo humano. Este artículo identifica los principales aportes de la RV en tratamientos de rehabilitación muscular reportados en la literatura. Según las investigaciones analizadas, se evidenció que, a diferencia de los tratamientos convencionales

para la rehabilitación muscular, los realizados con RV incrementaron el nivel de motivación de los pacientes para culminar con éxito, gracias al ambiente interactivo que la RV ofrece. Así mismo, de acuerdo con los estudios revisados, los pacientes manifestaron disminución de dolor durante y después de las terapias.

Palabras clave: Realidad virtual; rehabilitación; lesión muscular; fisioterapia

- 1 Artículo de revisión derivado del Trabajo desarrollado en el marco de la iniciativa "Producción investigativa en desarrollo sostenible", financiado por la Universidad de la Costa y realizado en el período comprendido entre agosto de 2019 a febrero de 2020. Universidad de la Costa, Barranquilla – Colombia.
- 2 Ingeniera de Sistemas. Profesora Tiempo Completo Asistente, Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica. Universidad de la Costa. ORCID ID: 0000-0003-3100-1746. Correo: kcoronad@cuc.edu.co
- 3 Ingeniero de Sistemas. Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica. Universidad de la Costa. ORCID ID: 0000-0001-7404-1591 / Correo: aestan1@cuc.edu.co
- 4 Ingeniero de Sistemas. Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica. Universidad de la Costa. ORCID ID: 0000-0001-5460-4553 / Correo: bnatera1@cuc.edu.co
- 5 Magister en Ingeniería Industrial. Ingeniero Industrial. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería. Universidad Libre Seccional Barranquilla. ORCID ID: 0000-0001-5788-1732. Scopus ID: 56580393700. Correo: ricardoa.delahozl@unilibre.edu.co
- 6 Especialista en Estudios Pedagógicos. Psicóloga. Profesora Tiempo Completo Asistente, Departamento de Ciencias Sociales. Universidad de la Costa. ORCID ID: 0000-0002-9428-4846. Correo: ksalas@cuc.edu.co

Autor para Correspondencia: Kelly Johanna Coronado Ahumada, e-mail: kcoronad@cuc.edu.co
Recibido: 28/03/2020 Aceptado: 30/11/2021

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

The Added Value of Virtual Reality in Muscle Rehabilitation Treatments. A Literature Review

Abstract

Virtual reality (VR) is an alternative tool for the rehabilitation of various injuries of the human body. This paper identified the main contributions of RV in muscle rehabilitation treatments reported in the literature. According

to the analyzed research, it was shown that, unlike conventional treatments for muscle rehabilitation, those performed with RV increased the level of motivation of patients to successfully complete them, thanks to the interactive environment that VR offers. Likewise, according to the reviewed studies, the patients manifested decreased pain during and after therapies.

Keywords: Virtual reality; rehabilitation; muscle injury; physiotherapy

O Valor Agregado da Realidade Virtual nos Tratamentos de Reabilitação Muscular. Revisão de Literatura

Resumo

Nos últimos anos, a realidade virtual (VR) se estabeleceu como uma ferramenta alternativa para a reabilitação das diferentes lesões que o corpo humano pode sofrer. O objetivo desta revisão sistemática é identificar as principais contribuições evidenciadas em pesquisas anteriores sobre o assunto, que serviram de base para a formulação deste artigo. Para avaliação da literatura, foi realizada uma consulta preliminar nas principais bases de

dados, a partir da qual foram obtidos resultados que permitiram dimensionar a contribuição do VD na recuperação de lesões musculares. De acordo com a amostra, ficou evidente que, diferentemente dos tratamentos convencionais para reabilitação muscular, aqueles realizados com o VD aumentavam o nível de motivação dos pacientes para concluir com sucesso o tratamento, portanto a adesão a todas as terapias era mais alto, isso graças ao ambiente interativo que o RV consegue oferecer. Por outro lado, de acordo com os estudos revisados, os pacientes manifestaram diminuição da dor durante e após a realização de diferentes terapias implementadas em cada investigação.

Palavras-Chave: Realidade virtual; reabilitação; lesão muscular; fisioterapia.

Introducción

Para la Organización de las Naciones Unidas (ONU), luchar contra la desigualdad y promover la salud de las personas, constituye un objetivo de desarrollo sostenible (ONU, n.d.), el cual se aborda en esta revisión desde la perspectiva del mejoramiento de la calidad de vida de las personas, haciendo énfasis en el

tratamiento de trastornos o enfermedades no transmisibles, de las cuales hacen parte las lesiones musculares. Este tipo de lesiones son frecuentes en la vida cotidiana y abarcan un espectro de severidad que va desde daños leves (p.ej. una contractura muscular), hasta daños graves (p.ej. ruptura de las fibras que componen los músculos). De otra parte, se ha encontrado evidencia en la literatura con relación al uso

de la realidad virtual (RV) como herramienta terapéutica alternativa e innovadora para el tratamiento de lesiones musculares, respecto a las terapias convencionales. Autores como Volovik, Borzikov, Kuznetsov, Bazarov, & Polyakova (2018) afirman que la RV “brinda la oportunidad de mejorar las habilidades motoras de manera más efectiva en el mismo contexto que en la vida real, debido a los tres elementos clave necesarios para entrenar las funciones motoras (estimulación repetida, retroalimentación sensorial, motivación del paciente)”.

Este artículo consiste en una revisión literaria sobre los resultados de la utilización de RV como tratamiento alternativo de rehabilitación muscular en pacientes con lesiones musculares. Aunque las contribuciones de la RV en la medicina han sido relevantes (Aggarwal et al., 2006; Colt, Crawford, & Galbraith III, 2001; Hoffman et al., 2011; Marescaux et al., 1998; Park et al., 2007), hasta el momento existe muy poco énfasis en el tratamiento de rehabilitación derivado de lesiones propias de los músculos, lo que demuestra la escasez de información con respecto a esta área.

La revisión sistemática efectuada trató de determinar cuáles han sido los aportes que ha evidenciado la realidad virtual en la mejora de pacientes bajo tratamiento de rehabilitación muscular, todo esto con base en estudios previos realizados en esta área específica. Adicionalmente, se buscó identificar la efectividad de la rehabilitación con RV frente a los métodos convencionales, debido

a que una de sus principales ventajas es que, además de proporcionar a los pacientes una retroalimentación sobre su desempeño motor, ofrece también un aumento en la motivación y el compromiso global (actividad física) durante el entrenamiento a través de escenarios similares al juego (Zimmerli, Jacky, Lünenburger, Riener, & Bolliger, 2013).

De acuerdo con la investigación realizada, “varias escenas de realidad virtual pueden hacer que el ejercicio sea más divertido e interesante, aumentando así la motivación del paciente para realizar los movimientos de rehabilitación” (Ye Ding, Sivak, Weinberg, Mavroidis, & Holden, 2010). Con base en lo anterior, se puede inferir que, gracias a la implementación de la RV, los pacientes se encuentran motivados al momento de realizar las terapias en su totalidad y, de este modo obtener el mayor beneficio posible en su recuperación.

Materiales y Métodos

Una revisión sistemática es “una manera de evaluar e interpretar toda la investigación disponible relevante respecto a un interrogante de investigación particular, en un área temática o fenómeno de interés” (Kitchenham, 2004). Según lo anterior y siguiendo el protocolo mencionado en la Tabla No. 1, se realizó una revisión sistemática con el fin de identificar los aportes de la RV en la rehabilitación de pacientes con trastornos o lesiones musculares, tomando como base la pregunta de investigación planteada.

Tabla No. 1. Protocolo de revisión sistemática.

| Nº | PROCESO | DESCRIPCIÓN |
|----|--|--|
| 1 | Definición de la pregunta de investigación | De acuerdo con la literatura, ¿Qué aportes ha evidenciado la realidad virtual en la mejora de pacientes bajo tratamiento de rehabilitación muscular? |

| Nº | PROCESO | DESCRIPCIÓN |
|----|---|--|
| 2 | Búsqueda de Documentos | Consulta en base de datos especializadas utilizando palabras clave |
| 3 | Selección y Evaluación de la calidad de los documentos. | Criterios de inclusión y exclusión |
| 4 | Resultados de búsqueda, selección y evaluación de los documentos. | Extracción de información relevante para la revisión |
| 5 | Análisis y síntesis de los estudios seleccionados. | Análisis de datos a través de una matriz y operacionalización de variables |

Fuente: Elaborado por los autores

El principal objetivo de la presente revisión sistemática fue indagar sobre la aplicabilidad de la realidad virtual en tratamientos estrictamente de rehabilitación muscular. Es por ello por lo que como pregunta problema, se planteó la siguiente: *De acuerdo con la literatura, ¿Qué aportes ha evidenciado la realidad virtual en la mejora de pacientes bajo tratamiento de rehabilitación muscular?*

Para garantizar un número significativo de fuentes relacionadas con el propósito de la revisión sistemática, se realizaron búsquedas en *Scopus*, *IEEE* y *Web of Science*, empleando términos clave en idioma inglés (*Virtual Reality*, *Muscle Injury*, *Rehabilitation*). La investigación fue realizada con base en la literatura publicada hasta 2019, sin aplicar filtros de fecha.

Como criterios de inclusión y exclusión para clasificar los artículos, se consideró que aquellos que abarcaran la implementación de la realidad virtual como método o herramienta principal para la rehabilitación muscular, serían incluidos en la revisión. Por otro lado, se determinó excluir los artículos que no se enfocan en la temática anteriormente mencionada o, en su defecto, que no se relacionaron con la recuperación muscular del paciente, por ejemplo, aquellos que apuntaban a la rehabilitación neurológica.

Sin embargo, y en consideración de lo anterior, se estableció tener en cuenta exclusivamente aquellos artículos relacionados a la aplicación de terapias de rehabilitación muscular a pacientes que, luego de haber sufrido un accidente cerebrovascular o lesión de médula, las requiriera.

Lo anteriormente mencionado se organizó en una matriz para posterior identificación de variables y su operacionalización, todo esto con el fin de analizar los artículos obtenidos y dar respuesta a la pregunta problema formulada.

Resultados

Se realizó la búsqueda preliminar de las fuentes utilizando estrategias de búsqueda que incluyeran las palabras clave de la investigación, la cual arrojó 105 artículos relacionados con el tema principal. De estos, un total de 20 cumplieron con los criterios de inclusión (ver Figura No. 1).

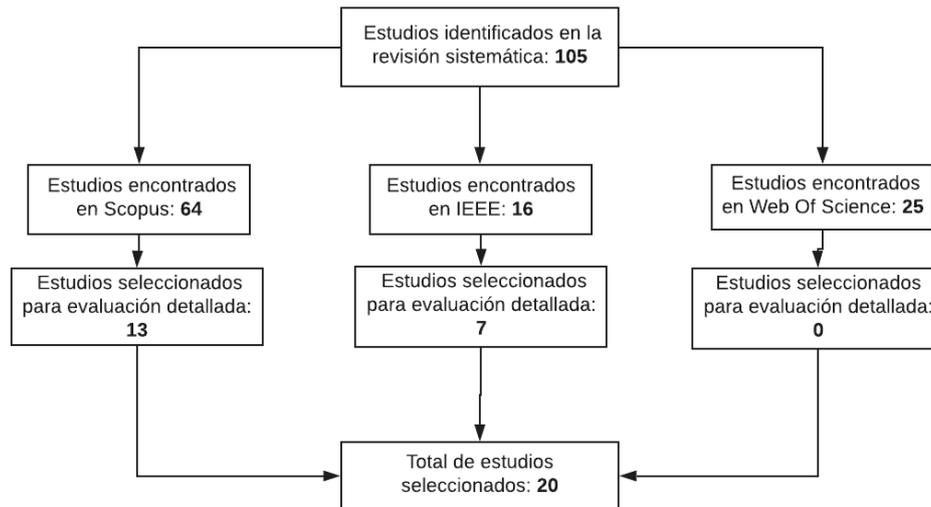


Figura No. 1 Proceso de filtrado de los estudios según los criterios de Inclusión y exclusión.

Fuente: Elaborado por los autores

Posterior al análisis de los artículos previamente seleccionados, debido a que las fuentes consultadas no demostraban una segmentación de la población objeto de estudio, se determinó que esta sería evaluada de forma general.

De los artículos revisados, se organizó la información de cada uno en una matriz en la que se identificaron factores relevantes como la fuente de la consulta, el título, los autores, año de publicación, la metodología utilizada y una síntesis de la investigación, esto con el fin de identificar aspectos que permitieran dimensionar los aportes realizados por la RV en cada caso (Ver Tabla No. 2).

Tabla No. 2. Matriz de revisión sistemática.

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|---|-------------------------|---|--|
| Virtual reality rehabilitation system for neuropathic pain and motor dysfunction in spinal cord injury patients | Villiger et al., (2013) | Creación del primer sistema de entrenamiento de RV que combina la observación y ejecución de acciones dirigidas a la función de las extremidades inferiores en pacientes con SCI incompleta (iSCI). Una característica particular del sistema es el uso de zapatas de tamaño ajustable con sensores de movimiento integrados. | Los resultados obtenidos en esta prueba demostraron una mejoría en las funciones de las extremidades inferiores al implementar la realidad virtual (RV) en los pacientes con lesiones de la médula espinal (SCI), con una leve reducción del dolor. La investigación evidencia la integración de la RV con el área de la fisioterapia. |

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|--|------------------------------------|--|--|
| Sport-Specific Virtual Reality to Identify Profiles of Anterior Cruciate Ligament Injury Risk During Unanticipated Cutting | Kiefer et al., (2017) | El estudio actual examinó el efecto de entrenamiento neuromuscular (NMT) aumentado, impulsado por <i>biofeedback</i> (aNMT) en la transferencia de habilidades de los patrones de movimiento resistentes a las lesiones de LCA durante la ejecución de escenarios VR específicos del deporte. | El estudio realizado a una muestra de jugadores de fútbol femenino arrojó una mejora significativa al prevenir y reducir los riesgos de lesiones de Ligamento Cruzado Anterior (LCA) a través de entrenamiento neuromuscular. Además, este estudio empleó RV inalámbrica ambulatoria y evidenció avances significativos en la prevención de lesiones de LCA en deportistas. |
| NUVABAT: Northeastern University Virtual Ankle and Balance Trainer | Ye Ding et al., (2010) | Describe un dispositivo mecatrónico de dos grados de libertad (DOF) con una interfaz de RV desarrollado para satisfacer las necesidades de pacientes con lesiones de tobillo y equilibrio, denominado Sistema de Rehabilitación del Entrenador Virtual de Tobillo y Equilibrio de Northeastern University (NUVABAT) | Al desarrollar e implementar el dispositivo de rehabilitación, se demostró que se puede medir la cinemática del tobillo y el equilibrio, aportando así a retomar control de los movimientos. Esta rehabilitación facilitó la recuperación de los movimientos del tobillo y mejoró el equilibrio. |
| Interactive Physiotherapy: An Application Based on Virtual Reality and Bio-feedback | Baqai, Memon, Memon, & Shah (2019) | Se proponen ejercicios de rutina que no requieren intervención física, empaquetándolos en un entorno de juego de Realidad Virtual (RV) para que los pacientes mejoren la movilidad de las articulaciones y los músculos al mismo tiempo que brindan un control continuo de los signos vitales utilizando biosensores. | Se implementó un software interactivo, eficiente e interesante para la rehabilitación muscular de los pacientes. Gracias a dicho dinamismo, algunos pacientes demostraron interés y motivación en realizar el juego basado en RV, lo que conllevaba a cumplir a cabalidad con los ejercicios de la terapia y así culminar la rehabilitación, obteniendo una pronta recuperación o disminución de dolor en las articulaciones y los músculos afectados. |
| Inexpensive Virtual Assisted Rehabilitation System (VARS) for Lower Part Injuries | Bayan et al., (2017) | El Sistema de Rehabilitación Asistida Virtual (VARS, por sus siglas en inglés) es una combinación de hardware y software que tiene como objetivo analizar el movimiento del paciente y tratar las lesiones de la parte inferior como distrofia muscular en las piernas. El sistema VARS proporciona dos procesos principales: diagnóstico y tratamiento. | Con el Sistema de Rehabilitación Virtual Asistida (VARS), de bajo costo, se demostró notable mejoría de los pacientes con lesiones de la parte inferior como distrofia muscular y lesiones deportivas. El sistema brinda al paciente un diagnóstico, tratamientos y ejercicios para su rehabilitación. |

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|---|--|--|---|
| Enhancing Effectiveness of Motor Rehabilitation Using Kinect Motion Sensing Tecnología | Roy, Soni, & Dubey (2013) | Muestra el desarrollo de Kinect-o-Therapy: implementación de rutinas de ejercicios para diferentes partes del cuerpo. Ayudó a las personas con discapacidades motoras de etiologías distintas. Kinect-o-Therapy incorpora juegos que procesan la entrada 3D, utilizando el sensor de movimiento Microsoft Kinect para construir un sistema de rehabilitación efectivo. | La aplicación Kinect-o-Therapy, resultó de fácil uso tanto para los pacientes como para los fisioterapeutas. El entorno del juego garantiza que los pacientes tengan una mejor disponibilidad a la hora de hacer las terapias, lo cual permite cumplir con la rehabilitación motora. Una de las principales ventajas es que esta aplicación puede ser usada en casa con la familia por pacientes con distintas discapacidades físicas, sin requerir costo de mantenimiento. |
| Design of A Wearable Rehabilitation Robotic Hand Actuated by Pneumatic Artificial Muscles | Kexin, Jian, Qi, & Yongji (2009) | Se diseñó una Mano Robótica de Rehabilitación Impulsada por Músculo Artificial (PAM) que proporciona las fuerzas de asistencia necesarias para agarrar y soltar los objetos. El robot tiene dos grados distintos de libertad: en el pulgar y los dedos. Los sensores incorporados se emplean para obtener la posición de retroalimentación y la información de fuerza para el control del robot y la evaluación cuantitativa del desempeño de la tarea. | La mano robótica portátil de rehabilitación muscular fue favorable para pacientes con accidente cerebrovascular, puesto que los apoyó a realizar movimientos de agarre y liberación de objetos para la recuperación de los músculos afectados de la mano. Gracias a este prototipo los pacientes mostraron una inmersión en la realización de las actividades de recuperación. |
| Clinical, functional and kinematic correlations using the Virtual Reality System toyra® as upper limb rehabilitation tool in people with spinal cord injury | Dimbwadyo-Terrer et al., (2013) | El método utilizado fue el Sistema de realidad virtual (VR) Toyra®. Consiste en un dispositivo que captura el movimiento del paciente y lo representa en un avatar en un monitor. Está considerado como una herramienta de evaluación y rehabilitación para personas con tetraplejía. | El sistema de RV demostró ser de utilidad para pacientes con lesión de la médula espinal cervical (LME) pues se implementó como herramienta de evaluación y de rehabilitación. Se evidenciaron mejoras en cuanto a la extensión de las muñecas, lo cual genera que este prototipo sea considerado como una herramienta de evaluación, rehabilitación del movimiento y funcionalidad de las extremidades superiores. |
| Efeitos da Realidade Virtual em Paciente Adulto com Paralisia Braquial Obstétrica | Rodrigues, Pagnussat, & Chiquetti (2012) | Los pacientes fueron evaluados antes y después de usar la consola Nintendo Wii como herramienta para el tratamiento de rehabilitación terapéutica. En esta modalidad los pacientes pudieron realizar las actividades, movimientos y ejercicios que no podían hacer en situaciones reales por medio de la prueba de Caja y Bloques, Biofotogrametría, Dinamometría y escala de Borg modificada. La intervención terapéutica se realizó utilizando Wii® durante 15 sesiones. | Este tratamiento de rehabilitación por medio de RV en pacientes con Parálisis Braquial Obstétrica (PBO), arrojó una mejora muscular en las funciones de las extremidades superiores (codo y hombro). Los pacientes que utilizaron este método tuvieron un aumento de la fuerza en los músculos que generan el movimiento del hombro y una mejora en la motricidad. |

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|--|----------------------------------|---|--|
| Virtual Reality- Augmented Neurorehabilitation Improves Motor Function and Reduces Neuropathic Pain in Patients with Incomplete Spinal Cord Injury | Villiger et al., (2013) | El método empleado fue la utilización de un sistema de RV para que los pacientes tuvieran una vista en primera persona de sus miembros inferiores virtuales, controlados a través de sensores de movimiento ajustados a los propios zapatos del paciente. | Los resultados fueron positivos en pacientes con lesión incompleta de la médula espinal, quienes informaron sentir avances en su equilibrio y el proceso de caminar. Esto indicó una mejoría en el corto plazo en las extremidades inferiores y reducción del dolor neuropático. Aunque se demuestran avances de recuperación en pacientes con lesión crónica e incompleta de la médula espinal (iSCI) se requieren más estudios sobre su efectividad y considerarlo como una herramienta de rehabilitación muscular. |
| Virtual Reality Technology in Complex Medical Rehabilitation of Patients with Disabilities | Volovik et al. (2018) | Análisis de resultados de la aplicación de la realidad virtual en pacientes de diferentes edades, desde un punto de vista médico-terapéutico a través de la revisión de la literatura encontrada. | La revisión de la efectividad que puede representar la RV en pacientes con trastornos en el sistema motor evidencia resultados positivos en cuanto a la mejora de atrofas o lesiones musculares, neurológicas y esqueleto-musculares. La efectividad de la RV radica en la motivación e interés que capturara en el paciente, logrando reducir los niveles de deserción en las terapias y agilizando el proceso de recuperación. Además, puede convertirse en un método más accesible y asequible en cuanto a la reducción del costo de terapias y la distancia de los centros médicos especializados, esto, sin ignorar que las terapias deben ser personalizadas y supervisadas por profesionales. |
| sEMG based ANN for Shoulder Angle Prediction | Yee Mon Aung & Al-Jumaily (2012) | Elaboración de una red neuronal basada en datos reales obtenidos de sensores intramusculares en los pacientes. Se simuló una persona virtual a través de la fuerza ejercida por el paciente y capturada por los sensores, para determinar el grado de inclinación del hombro de un paciente en proceso de rehabilitación. | Aporta a la RV para la rehabilitación muscular desde la captura de datos. Ofrece una alternativa para mejorar la exactitud de los datos que se capturan mediante la inductancia de los sensores instalados en la parte interna de la piel del paciente. La implementación de redes neuronales da un paso para el análisis de la información ya que logra simular el estado del cuerpo y mediante esos datos se puede realizar una estimación del progreso de la rehabilitación. |

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|--|---------------------|---|--|
| MIMICS: Multimodal Immersive Motion rehabilitation of upper and lower extremities by exploiting bio cooperation principles | Munih et al. (2009) | Sistema que incorpora robots médicos diseñados para terapias de rehabilitación de pacientes que han sufrido trastornos cerebrovasculares. Se emplea RV como método de inmersión y/o captura del paciente en las terapias. Emplea sensores que transfieren información háptica, visual y auditiva al paciente para motivar durante las sesiones. | La RV hace su aporte desde el punto de vista de la inmersión y motivación del paciente, suministrando una interfaz para la captura, procesamiento, análisis y emisión de datos relevantes en este tipo de patologías. El cumplimiento del factor de inclusión en este artículo observó la relación directa de la rehabilitación muscular en las terapias de recuperación de un accidente cerebrovascular. |
| Patient perspectives on virtual reality-based rehabilitation after knee surgery: Importance of level of difficulty | Lee et al. (2016) | Se cuantifican los resultados de la aplicación de RV en la terapia posquirúrgica de una lesión de rodilla. Se tomó una muestra de 25 personas a las cuales se les aplicó la terapia, para posteriormente evaluar los resultados mediante encuestas en las que el paciente asignaba un nivel de dolor a cada nivel de intensidad del ejercicio. | Se evidencia el aporte más importante de RV al proceso fisioterapéutico, la inmersión de los pacientes en las terapias interactivas con niveles de dificultad adaptados a las condiciones físicas y reguladas mediante la tolerancia al dolor de los pacientes que participaron en el proyecto. Mediante encuestas se estimó un nivel de aprobación y de adherencia a la terapia por encima del 90 %, demostrando que la lúdica reduce el temor o falta de interés a las terapias convencionales. El objetivo era llevar las terapias a personas en proceso de recuperación de una cirugía de rodilla, teniendo en cuenta que para el movimiento de la articulación intervienen varios músculos. |
| A Virtual Reality Assisted Rehabilitation System for Physical Therapy | Bayan et al. (2018) | Implementación de un sistema de rehabilitación virtual asistido, para cuantificar y cualificar datos reales con sensores instalados en partes del cuerpo del paciente y en una plataforma. El prototipo fue probado en una muestra de 22 personas, 12 de ellos con la necesidad de terapias de rehabilitación y 10 en condiciones normales como valor real o guía para comparación de resultados. | Este sistema arroja resultados en cuanto a la mejora de pacientes con lesiones musculares y de movimiento articular, a bajo costo. Los resultados se cuantifican por sensores que capturan la presión ejercida por el paciente y el movimiento articular sobre una plataforma especialmente diseñada, midiendo la fuerza ejercida por el músculo durante la terapia. Este proyecto mostró la inmersión de los pacientes y su evolución a un bajo costo. |

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|---|--|--|---|
| Using augmented reality gaming system to enhance hand rehabilitation | Hsian-shen Wang, Chaoli Hsu, Chiu, & Tsai (2010) | Realización del diseño e implementación de un prototipo de ejercitación manual que incorpora RV (en cuanto al alcance de objetivos del juego) y Realidad Aumentada para capturar datos relacionados con la presión ejercida sobre el mecanismo y procesar dichos datos para tener una idea de la fuerza en las manos del paciente. | Capturar la atención del paciente y vincular la terapia con la lúdica para lograr la motivación y participación del paciente en el proceso. Este artículo se centra en la recuperación de la fuerza de agarre de la mano, a través del registro de la medida de la presión ejercida sobre una pelota. En este prototipo se trabaja la rehabilitación muscular de la mano, así como las articulaciones y los tendones, luego de lesiones por accidentes traumáticos. |
| Augmented Reality based Illusion System with Biofeedback | Y M Aung & Al-Jumaily (2014) | Desarrollo de un sistema electrónico-lógico capaz de detectar movimientos esqueléticos y musculares para analizar resultados del proceso de rehabilitación en pacientes con Parkinson. Los datos se capturan a través de sensores capacitivos instalados en el paciente y con un sistema Kinect de Xbox. Se realizó <i>feedback</i> de manera visual y auditiva al paciente sobre el progreso obtenido durante la terapia, según un algoritmo el cual procesa la información almacenada en una base de datos para dar biorrealimentación oportuna. | Muestra la relación que tiene la actividad muscular con el mal de Parkinson y su tratamiento mediante RV. Los ejercicios planteados en la metodología fisioterapéutica son utilizados en terapias de rehabilitación muscular. A diferencia de otras implementaciones, se destaca la incorporación de un grupo de asesores de monitoreo de signos vitales del paciente (p.ej. el ritmo cardíaco), para un ambiente más controlado, entregando datos en tiempo real, dando un análisis más completo de la sinergia del cuerpo en la terapia practicada. |
| Critical illness VR rehabilitation device (X-VR-D): Evaluation of the potential use for early clinical rehabilitation | Van de Meent, Baken, Van Opstal, & Hogendoorn (2008) | Elaboración de un prototipo de silla hidráulica con movimientos controlados, para simular un entorno de vuelo espacial. Dichos movimientos generan mayor activación muscular en el cuerpo del paciente, gracias a la resistencia que este último puede ejercer frente a movimientos generados por la silla. De esas reacciones se obtienen los datos para el posterior análisis. | A través de los ejercicios que incorporan RV propuestos en esta investigación se pueden lograr pequeñas mejoras en la movilidad del paciente y el estado físico en general. Esta investigación buscó mejorar la calidad de vida de los pacientes, a través de estimulaciones graduales con movimientos de una silla especialmente diseñada que activa los músculos tratados, reduciendo la espasticidad y la debilidad del sistema osteomuscular. |
| Home-Based Virtual Reality-Augmented Training Improves Lower Limb Muscle Strength, Balance, and Functional Mobility following Chronic Incomplete Spinal Cord Injury | Villiger et al. (2017) | Diseño e implementación de un sistema de rehabilitación que emplea RV como entorno gráfico de inmersión y una configuración electrónica para percibir movimientos de los pacientes por medio de sensores, los cuales digitalizan la información y la envían al computador del paciente, para su posterior análisis. Este sistema está diseñado para personas con secuelas de una lesión de médula espinal que les reduce la fuerza muscular en las extremidades inferiores. | Se puede clasificar la terapia presentada en este artículo como un aporte en el uso de RV a la rehabilitación muscular, donde la motivación del paciente, a través de la inmersión en el juego mismo, fue un factor destacado. De este interés, se puede lograr la constancia del paciente y de esta manera acelerar las mejoras. |

| TÍTULO | AUTORES | MÉTODO | SÍNTESIS |
|---|------------------------|--|--|
| Increasing Patient Engagement During Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation | Zimmerli et al. (2013) | Se evaluó la influencia de ciertas características del diseño de ejercicios en el nivel de participación durante la rehabilitación de las extremidades inferiores. La hipótesis planteaba que los ejercicios de RV aumentan el compromiso del paciente, sólo si son interactivos, es decir, si proporcionan reacciones funcionalmente significativas al rendimiento motriz, aquellos con objetivos explícitos de trabajo, generan mayor compromiso con el rendimiento. | El objetivo de los autores es determinar la efectividad de las terapias a través de los datos obtenidos mediante electrodos, además del compromiso de los pacientes para la realización de las terapias y la evaluación de la retroalimentación funcional en el factor de compromiso del paciente en la culminación del ciclo terapéutico. |

Fuente: elaborado por los autores

Al organizar las fuentes relacionadas en la Tabla No. 2, se extrajeron los aspectos más importantes de cada artículo con el fin de evaluar el uso y la implementación de la RV en la rehabilitación muscular. Además, se realizó la clasificación de la muestra según el enfoque de las lesiones musculares abordadas en cada uno de ellos. Dicha clasificación se ilustra en la Tabla No. 3.

Tabla No. 3. Clasificación de las terapias según su enfoque.

| Tipo de enfoque | Cantidad de artículos |
|-------------------------------|-----------------------|
| Inferior | 8 |
| Superior | 4 |
| Superior e Inferior | 1 |
| Prevención de lesión inferior | 1 |
| Activación Muscular | 6 |

Fuente: Elaborado por los autores

A partir de la matriz de revisión sistemática, se clasificaron los artículos según el año de publicación, lo cual se ilustra en la Figura No. 2 donde se muestra la serie de tiempo del número de artículos publicados en el tema por año. Allí se observa que a partir del año 2011,

coincidente con el lanzamiento de tecnologías como Microsoft Kinect y la consola Nintendo Wii, aumentaron los aportes a la literatura (Rodrigues et al., 2012; Roy et al., 2013), haciéndose evidente un incremento del número de publicaciones en los últimos 10 años.

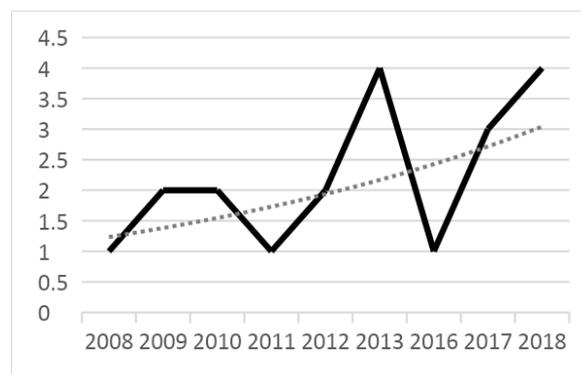


Figura No. 2. Clasificación de artículos por año.

Fuente: Elaborado por los autores

Para efectos de valoración de los resultados obtenidos, fue necesaria la operacionalización de variables. Entre estas se identificaron:

- **Factor motivacional:** Se define como el interés demostrado por los pacientes al realizar las terapias, debido a la curiosidad y motivación que despiertan los ejercicios planteados. Este factor

constituye uno de los más significativos aportes de las terapias que incorporan realidad virtual como método de rehabilitación.

- **Inmersión en las terapias:** Corresponde al nivel de incorporación del paciente en el proceso terapéutico, logrando adoptar la terapia como un juego y no como un proceso médico convencional.
- **Influencia en la calidad de vida:** Determinación de las fuentes que se enfocan en el mejoramiento de las condiciones de vida relacionadas con lesiones de tipo muscular, debido a que muchas de estas lesiones dificultan la realización de tareas cotidianas en los pacientes que las padecen, reduciendo consigo la autonomía.

- **Etapa de aplicabilidad:** Se refiere a la fase en la que se aplica la terapia propuesta, de acuerdo con los artículos seleccionados, es decir, si se realiza antes de que ocurra una lesión, se tipifica como “prevención de lesión”; si es el proceso inmediatamente siguiente a la lesión, se tipifica como “durante la recuperación”; si es después de un proceso fisioterapéutico convencional, se tipifica como: “después de la recuperación”; y si es empleado en personas que hayan quedado con secuelas de una lesión muscular grave y requieren constante tratamiento, se tipifica como “tratamiento continuo”.

Las variables definidas se analizaron en cada uno de los estudios, según se muestra en la Tabla No. 4.

Tabla No. 4. Operacionalización de variables de análisis del estudio

| VARIABLE | AUTORES |
|---|--|
| FACTOR MOTIVACIONAL | (Villiger et al., 2011), (Ye Ding et al., 2010), (Baqai et al., 2019), (Bayan et al., 2017), (Roy et al., 2013), (Kexin et al., 2009), (Dimbwadyo-Terrer et al., 2013), (Rodrigues et al., 2012), (Villiger et al., 2013), (Volovik et al., 2018), (Lee et al., 2016), (Bayan et al., 2018), (Y M Aung & Al-Jumaily, 2014), (Villiger et al., 2017), (Munih et al., 2009), (Hsian-shen Wang et al., 2010), (Zimmerli et al., 2013) |
| INMERSIÓN EN LAS TERAPIAS | (Villiger et al., 2011), (Dimbwadyo-Terrer et al., 2013), (Villiger et al., 2013), (Lee et al., 2016), (Bayan et al., 2018), (Van de Meent et al., 2008), (Villiger et al., 2017), (Munih et al., 2009), (Hsian-shen Wang et al., 2010), (Zimmerli et al., 2013) |
| INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE VIDA | (Villiger et al., 2011), (Kiefer et al., 2017), (Baqai et al., 2019), (Bayan et al., 2017), (Dimbwadyo-Terrer et al., 2013), (Rodrigues et al., 2012), (Villiger et al., 2013), (Volovik et al., 2018), (Bayan et al., 2018), (Y M Aung & Al-Jumaily, 2014), (Van de Meent et al., 2008), (Yee Mon Aung & Al-Jumaily, 2012) |
| COMPARACIÓN CON OTROS TRATAMIENTOS | (Dimbwadyo-Terrer et al., 2013), (Volovik et al., 2018), (Lee et al., 2016), (Bayan et al., 2018), (Villiger et al., 2017), (Munih et al., 2009), (Yee Mon Aung & Al-Jumaily, 2012), (Zimmerli et al., 2013) |

Fuente: elaborado por los autores

En cuanto al análisis realizado de los artículos que involucran el Factor Motivacional, Inmersión en las terapias e Influencia en la calidad de vida, se puede destacar que en el estudio realizado por Villiger et al., (2011), el 33,3 % de los pacientes evaluados hasta la fecha demostraban motivación en la realización de los ejercicios, presentando mejoras en su bienestar físico. Además, los pacientes evaluados mostraron una fácil adaptación del juego de RV y se evidenció una mejora en el control de los miembros inferiores virtuales. Los resultados del estudio demuestran una disminución del dolor neuropático, aumento de la fuerza muscular y velocidad de la marcha, lo que favorece la calidad de vida del paciente.

Por otra parte, Dimbwadyo-Terrer et al. (2013) desarrollaron un sistema que aumenta la motivación de los pacientes al permitir medir y mostrarles su evolución; además de ser empleado para mejorar el movimiento de las extremidades superiores como la extensión de la muñeca. La inmersión en la terapia se evidencia en el estudio, debido a que los pacientes pueden interactuar con imágenes y manipular objetos virtuales, los cuales les permiten sumergirse a sí mismos dentro del entorno simulado.

En este mismo sentido, Villiger et al., (2013) a través de la implementación del software desarrollado, logró altos niveles de motivación por parte de los pacientes, lo cual generó una inmersión de los mismos al momento de realizar la terapia y culminación exitosa de la misma. Esto debido a que los pacientes lograron familiarizarse rápidamente con el sistema RV, colocando el máximo de atención durante cada entrenamiento.

Ahora bien, el nivel de asequibilidad a las terapias tradicionales pudiese llegar a ser alto. Sin embargo, Bayan et al. (2018) propone un sistema novedoso de bajo costo, el cual genera un impacto a nivel motivacional en pacientes a los cuales se les dificulta pagar el costo de las terapias convencionales, así como el traslado hacia los centros de rehabilitación. Por su interfaz interactiva y amigable para el usuario, la inmersión por parte de los pacientes es mucho mayor.

De los artículos que comparan su sistema con los tratamientos tradicionales, Dimbwadyo-Terrer et al. (2013) validaron Toyra como una herramienta innovadora de evaluación y rehabilitación de las extremidades superiores del cuerpo humano. En cuanto a (Lee et al., 2016), luego de tabular y analizar los resultados obtenidos de encuestas aplicadas a los pacientes, después de realizado el tratamiento, los investigadores comparan la efectividad de su sistema con los resultados de la aplicación de métodos convencionales.

Al mismo tiempo, el sistema diseñado por Bayan et al. (2018), se diferencia de las terapias de rehabilitación tradicionales por la posibilidad de diseñar una rutina de ejercicios personalizados, basándose en los datos que el sistema ofrece sobre el estado inicial del paciente. Así mismo, Yee Mon Aung & Al-Jumaily (2012) en su estudio comparan la calidad de este método y se sobrepone frente a las terapias convencionales, gracias a la complejidad y exactitud con la que este captura y procesa los datos relevantes para la evolución del paciente.

En cuanto a la etapa de aplicabilidad de las terapias, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla No. 5.

Tabla No. 5. Fuentes organizadas por etapas de aplicabilidad de las terapias

| ETAPA DE APLICABILIDAD | FUENTE |
|----------------------------|---|
| PREVENCIÓN DE LESIÓN | [Kiefer et al., 2017] |
| DURANTE LA RECUPERACIÓN | [Villiger et al., 2011], [Ye Ding et al., 2010], [Baqai et al., 2019], [Roy et al., 2013], [Kexin et al., 2009], [Dimbwadyo-Terrer et al., 2013], [Rodrigues et al., 2012], [Villiger et al., 2013], [Volovik et al., 2018], [Lee et al., 2016], [Munih et al., 2009], [Yee Mon Aung & Al-Jumaily, 2012], [Zimmerli et al., 2013] |
| DESPUÉS DE LA RECUPERACIÓN | [Bayan et al., 2017], [Bayan et al., 2018], [Villiger et al., 2017], [Hsian-shen Wang et al., 2010] |
| TRATAMIENTO CONTINUO | [Y M Aung & Al-Jumaily, 2014], [Van de Meent et al., 2008] |

Fuente: Elaborado por los autores

Discusión

De acuerdo a lo expuesto por Baqai et al. (2019),

La fisioterapia es una especialidad de rehabilitación que ayuda a aliviar las discapacidades físicas y promueve la movilidad y la calidad de vida del paciente. Se compone de equipo y personal para proporcionar movimientos forzados mecánicamente y diversos ejercicios que ayudan a retener y mejorar los movimientos motores en pacientes que sufren lesiones físicas o dolencias como la enfermedad de Parkinson, la artritis, el síndrome del túnel carpiano, el accidente cerebrovascular, etc.

A partir de este concepto y teniendo en cuenta la necesidad de mejora continua en el proceso de rehabilitación, nacen nuevas alternativas en cuanto a técnicas, herramientas y ejercicios que permitan mejorar la forma en la que se llevan a cabo estas terapias. De este modo, la ciencia de la tecnología hace su aporte a través de la inclusión de RV como método atractivo e inusual en el que el paciente se incorpora fácilmente a las terapias.

A través de la RV, los pacientes logran interactuar con contenido multimedia, manipular objetos virtuales y realizar otras actividades diseñadas especialmente para tratamientos específicos, que de alguna manera u otra les permite “sumergirse” en el entorno simulado y por lo tanto crear una sensación de “presencia” en el mundo virtual Trincado-Alonso et al., (2014), lo cual proporciona al paciente un ambiente ideal en el cual puede desarrollar los ejercicios propuestos por el terapeuta Ye Ding et al. (2010).

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos según los distintos tipos de enfoque mencionados en la Tabla 3, es posible hacer un análisis de acuerdo con los miembros afectados, así como de la activación muscular, de acuerdo con lo presentado en cada estudio revisado.

- **Lesiones en miembros inferiores del cuerpo**

Se identificó que los ocho estudios que trataron sobre lesiones de las extremidades inferiores del cuerpo, como la cadera, rodilla, tobillo, coordinación de la marcha y el equilibrio [Bayan et al., 2017, 2018; Lee et al., 2016; Villiger et al., 2013, 2011, 2017; Ye Ding et al., 2010;

Zimmerli et al., 2013), tuvieron en común el desarrollo de un prototipo cuya implementación de hardware y software incluía ejercicios que incorporan movimientos reales, estimulados a través de entornos virtuales y que, mediante sensores que empleados estratégicamente, permitieran cuantificar los datos acerca del progreso o del nivel de evolución del paciente.

- **Lesiones en miembros superiores del cuerpo**

En este tipo de enfoque, se encontraron cuatro artículos relacionados con la rehabilitación de las extremidades superiores del cuerpo. Ejemplo de ellos, es el tratamiento realizado en las manos de los pacientes, donde se desarrolló una mano robótica portátil de rehabilitación impulsada por músculo artificial, que proporciona la fuerza necesaria para agarrar y soltar los objetos asignados en el juego de RV (Hong Kong Institution of Engineers. Control, IEEE Control Systems Society., & Asian Control Association., 2009). El otro caso de la recuperación de la mano utilizó realidad virtual (RV) para que los pacientes ejercieran el control del movimiento simulado de apretar una pelota en el juego (Hsian-shen Wang et al., 2010). Por otra parte, las investigaciones que trabajaron traumas en el hombro y el brazo implementaron la RV y utilizaron RA para darle un enfoque más real al video juego. El juego consiste en que, cuando el brazo lesionado del paciente no cumple la tarea asignada, el sistema de ilusión de RA se hará cargo del trabajo y dicho paciente percibe que todavía se puede realizar el movimiento con esfuerzo propio (Baqai et al., 2019). El modelo humano de RV está desarrollado para simular el ángulo de flexión / extensión del hombro y sus movimientos (Yee Mon Aung & Al-Jumaily, 2012), ayudando al paciente a medir el grado máximo de ejecución de sus actividades. Se reflejaron resultados positivos en los tratamientos de las lesiones de las partes superiores del cuerpo.

- **Lesiones en los miembros superiores e inferiores del cuerpo**

La única fuente relacionada a este enfoque de investigación, plantea un prototipo de intervención multisensorial que permite tratar terapéuticamente a pacientes con lesiones neurológicas que interfieren en el movimiento muscular, todo esto a través del diseño de un sistema robótico asistido que permite generar estímulos y capturar la respuesta del organismo a través de sensores multimodales y clasificarlos según su tipo en variables tales como el movimiento, fuerza, voz, actividad muscular, frecuencia cardíaca, conductancia de la piel, entre otros (Munih et al., 2009). Además de esto, provee al paciente interfaces amigables que le permiten sumergirse en un entorno especialmente diseñado para él, esto con el fin de maximizar la motivación en la realización de las terapias.

- **Prevención de lesión inferior**

Según Kiefer et al. (2017), las atletas femeninas son las más perjudicadas con lesiones de ligamento cruzado anterior (LCA) durante las actividades de correr, saltar y cortar. Este riesgo se debe a los déficits en la cadena posterior y el reclutamiento de la cadera asociado con las cargas aberrantes de la rodilla. La identificación de estos factores ha conducido a la intervención de este tipo de lesión. Este estudio es el primero que implementa la RV inalámbrica ambulatoria para la prevención de daños en los LCA de los atletas durante la ejecución de sus tareas diarias en el deporte. La disminución inadecuada de la rotación de la cadera y la separación de la rodilla son hallazgos en las pruebas realizadas, estos resultados son el primer paso que valida la efectividad de la RV en el deporte como una herramienta útil para medir y prevenir los riesgos de deterioro de los LCA.

- **Activación muscular**

La tipificación de este enfoque radica en la generalidad de la estimulación muscular, hace referencia a las lesiones parciales o totales que requieren un estímulo sensorial a través de terapias fisioterapéuticas con movimientos forzados que permitan la activación energética de los músculos. Cinco de estos seis resultados se basan en la creación de prototipos de inmersión terapéutica especialmente diseñados para transportar al paciente en un entorno donde pueda percibir visualmente el movimiento que está generando su cuerpo. Ahora bien, cuatro de esos resultados apuntaron a la creación de juegos “serios”, cuya finalidad no es más que la de aumentar la motivación en la recuperación, puesto que este factor psicológico es determinante para la evolución de la salud del paciente.

A través de niveles de dificultad de juego, los pacientes estimulan al máximo las áreas de interés en su organismo logrando reducir el tiempo en la percepción de resultados (Baqai et al., 2019; Rodrigues et al., 2012; Roy et al., 2013; Trincado-Alonso et al., 2014; Van de Meent et al., 2008; Volovik et al., 2018).

Haciendo un análisis de los resultados obtenidos, se evidencia que el uso o implementación de la realidad virtual en entornos fisioterapéuticos ofrece resultados positivos, ya sea en los miembros superiores, inferiores o alguna terapia que estimula la activación muscular del cuerpo humano, como se refleja en la Tabla 4 donde se obtiene un 94 % de efectividad en cuanto al factor motivacional, un 50 % de efectividad en cuanto al nivel de inmersión en las terapias por parte del paciente y un 60 % basado en la mejora de la calidad de vida del paciente (disminución de dolor, reducción de fatiga muscular, aumento del equilibrio al caminar, entre otros factores que aumentan el autoestima e independencia del paciente). Basado en estos resultados se puede afirmar que los prototipos abordados en

esta revisión sistemática aportan de manera efectiva al proceso de recuperación de lesiones de tipo muscular sin importar en cuál sector del cuerpo humano se manifiesten.

De otra parte, es importante mencionar que, de los artículos incluidos en esta revisión, sólo una cantidad minoritaria presentaba resultados cuantitativos respecto a la disminución de dolor en los pacientes y a la efectividad de la terapia con RV frente a la convencional. Además, los resultados cualitativos fueron medibles en su mayoría por la percepción de los pacientes, lo cual puede considerarse un valor inconstante, debido a que depende directamente de la tolerancia que pueda tener un paciente en comparación con otro. Cabe resaltar que cada prototipo logra medir la respuesta a los estímulos, mediante la incorporación de sensores que procesan los datos a través de electromiogramas. Sin embargo, este tipo de implementación cuenta con cierta complejidad, lo cual genera un incremento en los costos de los prototipos y esto se convierte en encarecimiento para su utilización.

Conclusiones

Gracias a las contribuciones de la literatura seleccionada para cumplir con el propósito de esta revisión sistemática, se identificaron aportes relevantes y significativos sobre la implementación de realidad virtual en terapias de rehabilitación muscular, tales como la motivación de los pacientes, la reducción del dolor, prevención de lesiones, la capacidad de inmersión en un entorno virtual amigable al usuario y que provee condiciones ideales para la ejecución de las terapias. También se identificó la existencia de prototipos de bajo costo y de mayor accesibilidad para pacientes que no cuentan con los recursos necesarios para el traslado hacia los centros de rehabilitación especializados. De igual forma, los autores en sus investigaciones implementaron

dispositivos portátiles y de fácil manejo, para que los usuarios realicen sus actividades desde el hogar sin necesidad de supervisión constante. A pesar de los aportes encontrados hasta la fecha, es notoria la poca información relacionada con el tema en cuestión, por lo cual sería conveniente realizar una nueva revisión sistemática en los próximos años para evaluar los aportes de las investigaciones generados a partir del auge tecnológico actual.

La realidad virtual es una de las áreas de las tecnologías de la información que ha manifestado un crecimiento continuo en la

última década, por lo cual se podría estimar la continuidad en dicho crecimiento para los próximos años. Con la llegada de nuevos sensores más precisos e innovadores, se podrán obtener prototipos más avanzados que permitan obtener mayor exactitud en los datos y procesarlos de una forma más efectiva. La realidad aumentada como evolución de la realidad virtual promete ser partícipe del crecimiento de este tipo de terapias que ayudarán a la rehabilitación muscular, como se evidencia en los aportes más recientes de la literatura evaluada.

Referencias

- Aggarwal, R., Grantcharov, T. P., Eriksen, J. R., Blirup, D., Kristiansen, V. B., Funch-Jensen, P., & Darzi, A. (2006). An evidence-based virtual reality training program for novice laparoscopic surgeons. *Annals of Surgery*, 244(2), 310–314. <https://doi.org/10.1097/01.sla.0000218094.92650.44>
- Aung, Y M, & Al-Jumaily, A. (2014). Augmented Reality based Illusion System with biofeedback. In the *Middle East Conference on Biomedical Engineering, MECBME* (pp. 265–268). <https://doi.org/10.1109/MECBME.2014.6783255>
- Aung, Yee Mon, & Al-Jumaily, A. (2012). sEMG Based ANN for Shoulder Angle Prediction. *Procedia Engineering*, 41, 1009–1015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.276>
- Baqai, A., Memon, K., Memon, A. R., & Shah, S. M. Z. A. (2019). Interactive Physiotherapy: An Application Based on Virtual Reality and Bio-feedback. *Wireless Personal Communications*, 106(4), 1719–1741. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5382-5>
- Bayan, S., Assaf, K., Yassin, M., Cherry, A., Raad, M., & Hamawy, L. (2017). Inexpensive Virtual Assisted Rehabilitation System (VARS) for lower part injuries. In *2017 Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICABME.2017.8167539>
- Bayan, S., Assaf, K., Yassin, M., Cherry, A., Raad, M., & Hamawy, L. (2018). A Virtual Reality Assisted Rehabilitation System for Physical Therapy. In *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)* (pp. 32–40). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COMAPP.2018.8460301>
- Colt, H. G., Crawford, S. W., & Galbraith III, O. (2001). Virtual reality bronchoscopy simulation: A revolution in procedural training. *Chest*, 120(4), 1333–1339. <https://doi.org/10.1378/chest.120.4.1333>
- Dimbwadyo-Terrer, I., Trincado-Alonso, F., De Los Reyes-Guzmán, A., Bernal-Sahún, A., López-Monteagudo, P., Polonio-López,

- B., & Gil-Agudo, Á. (2013). Clinical, functional and kinematic correlations using the Virtual Reality System toyra® as upper limb rehabilitation tool in people with spinal cord injury. In *NEUROTECHNIX 2013-Proceedings of the International Congress on Neurotechnology, Electronics and Informatics* (pp. 81-88).
- Hoffman, H. G., Chambers, G. T., Meyer III, W. J., Arceneaux, L. L., Russell, W. J., Seibel, E. J., ... Patterson, D. R. (2011). Virtual reality as an adjunctive non-pharmacologic analgesic for acute burn pain during medical procedures. *Annals of Behavioral Medicine, 41*(2), 183-191. <https://doi.org/10.1007/s12160-010-9248-7>
- Hong Kong Institution of Engineers, Control, A. & I. D., IEEE Control Systems Society, & Asian Control Association. (2009). *ASCC 2009: the proceedings of 2009 7th Asian Control Conference: Hong Kong Convention and Exhibition Centre, Hong Kong: August 27-29, 2009*. ACA.
- Hsian-shen Wang, Chaoli Hsu, Chiu, D., & Tsai, S.-N. (2010). Using augmented reality gaming systems to enhance hand rehabilitation. In *2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer* (pp. V3-243-V3-246). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETC.2010.5529553>
- Kexin, X., Jian, H., Qi, X., & Yongji, W. (2009). Design of a wearable rehabilitation robotic hand actuated by pneumatic artificial muscles. In *Proceedings of 2009 7th Asian Control Conference, ASCC 2009* (pp. 740-744).
- Kiefer, A. W., DiCesare, C., Bonnette, S., Kitchen, K., Gadd, B., Thomas, S., ... Silva, P. (2017). Sport-specific virtual reality to identify profiles of anterior cruciate ligament injury risk during unanticipated cutting. In *2017 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2017.8007511>
- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews*.
- Lee, M., Suh, D., Son, J., Kim, J., Eun, S.-D., & Yoon, B. (2016). Patient perspectives on virtual reality-based rehabilitation after knee surgery: Importance of level of difficulty. *Journal of Rehabilitation Research and Development, 53*(2), 239-252. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2014.07.0164>
- Marescaux, J., Clément, J.-M., Tasseti, V., Koehl, C., Cotin, S., Russier, Y., ... Ayache, N. (1998). Virtual reality applied to hepatic surgery simulation: The next revolution. *Annals of Surgery, 228*(5), 627-634. <https://doi.org/10.1097/00000658-199811000-00001>
- Munih, M., Riener, R., Colombo, G., Lunenburger, L., Muller, F., Slater, M., & Mihelj, M. (2009). MIMICS: Multimodal immersive motion rehabilitation of upper and lower extremities by exploiting bio cooperation principles. In *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics* (pp. 127-132). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209544>
- ONU. (n.d.). Objetivo 3: Salud y bienestar | PNUD.
- Park, J., MacRae, H., Musselman, L. J., Rossos, P., Hamstra, S. J., Wolman, S., & Reznick, R. K. (2007). Randomized controlled trial of virtual reality simulator training: transfer to live patients. *American Journal*

- of Surgery*, 194(2), 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2006.11.032>
- Rodrigues, B., Pagnussat, A., & Chiquetti, E. (2012). Efeitos da Realidade Virtual em Paciente Adulto com Paralisia Braquial Obstétrica. *Revista Neurociências*, 20, 567–575. <https://doi.org/10.4181/RNC.2012.20.720.9p>
- Roy, A. K., Soni, Y., & Dubey, S. (2013). Enhancing effectiveness of motor rehabilitation using kinect motion sensing technology. In *2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)* (pp. 298–304). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GHTC-SAS.2013.6629934>
- Trincado-Alonso, F., Dimbwadyo-Terrer, I., de los Reyes-Guzmán, A., López-Monteagudo, P., Bernal-Sahún, A., & Gil-Agudo, Á. (2014). Kinematic Metrics Based on the Virtual Reality System Toyra as an Assessment of the Upper Limb Rehabilitation in People with Spinal Cord Injury. *BioMed Research International*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/904985>
- Van de Meent, H., Baken, B. C. M., Van Opstal, S., & Hogendoorn, P. (2008). Critical illness VR rehabilitation device (X-VR-D): Evaluation of the potential use for early clinical rehabilitation. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(3), 480–486. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.11.005>
- Villiger, M., Bohli, D., Kiper, D., Pyk, P., Spillmann, J., Meilick, B., ... Eng, K. (2013). Virtual Reality-Augmented Neurorehabilitation Improves Motor Function and Reduces Neuropathic Pain in Patients With Incomplete Spinal Cord Injury. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 27(8), 675–683. <https://doi.org/10.1177/1545968313490999>
- Villiger, M., Hepp-Reymond, M.-C., Pyk, P., Kiper, D., Eng, K., Spillman, J., ... Hotz-Boendermaker, S. (2011). Virtual reality rehabilitation system for neuropathic pain and motor dysfunction in spinal cord injury patients. In *2011 International Conference on Virtual Rehabilitation* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2011.5971865>
- Villiger, M., Liviero, J., Awai, L., Stoop, R., Pyk, P., Clijsen, R., ... Bolliger, M. (2017). Home-Based Virtual Reality-Augmented Training Improves Lower Limb Muscle Strength, Balance, and Functional Mobility following Chronic Incomplete Spinal Cord Injury. *Frontiers in Neurology*, 8, 635. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00635>
- Volovik, M. G., Borzikov, V. V., Kuznetsov, A. N., Bazarov, D. I., & Polyakova, A. G. (2018). Virtual Reality Technology in Complex Medical Rehabilitation of Patients with Disabilities [Review]. *Sovremennye Tehnologii v Medicine*, 10(4), 173. <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.4.21>
- Ye Ding, Sivak, M., Weinberg, B., Mavroidis, C., & Holden, M. K. (2010). NUVABAT: Northeastern university virtual ankle and balance trainer. In *2010 IEEE Haptics Symposium* (pp. 509–514). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2010.5444608>
- Zimmerli, L., Jacky, M., Lünenburger, L., Riener, R., & Bolliger, M. (2013). Increasing Patient Engagement During Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(9), 1737–1746. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.01.029>