

Sistema de Realidad Virtual Para Entrenamiento y Análisis Biomecánico de Pacientes Con Amputación Transhumeral

F. J. Rodal Martínez^{1*}, I. Quiñones Urióstegui², C. Galván Dúque Gastelum³, C.L. Vilchis Zapata⁴

¹Alumno de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Iberoamericana, Ciudad de México, México.

²Jefe de Servicio Laboratorio de Análisis de Movimiento, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México.

³Órtesis y Prótesis, Instituto de Investigación Aplicada y Tecnología, Ciudad de México, México.

⁴Director de Desarrollo Tecnológico, HCG Technologies, Ciudad de México, México.

*francisco.rodal@hotmail.com

Abstract— Virtual Reality is defined as an interactive and multisensory computer system in which an environment is simulated in real time, and there can be two categories: Immersive Virtual Reality and Non-Immersive Virtual Reality. To date, Virtual Reality has been used in different areas such as education, entertainment and rehabilitation. The WHO estimates that around 15% of the world's population suffers from a disabling condition. This organization in conjunction with the ISPO determined that about 0.5% of the world's population requires an orthotic or prosthetic system. In Mexico, in the National Survey of Demographic Dynamics it is estimated that 10.9% of the population has difficulty walking or moving. The objective of this project is to design a Virtual Reality system that allows training transhumeral amputees in the use of the prosthesis. 2 virtual environments and 8 3D-characters were created so that the subjects to be trained can select between these possibilities to carry out the training sessions. The subjects control these 3D-characters in real time through a motion capture system, which also generates a biomechanical analysis of the movement of the shoulder during the execution of the movements.

Palabras clave— Amputación Transhumeral, Biofeedback, Biomecánica, Rango de Movimiento, Realidad Virtual, Rehabilitación.

I. INTRODUCCIÓN

A. La discapacidad y las amputaciones

La discapacidad es una condición que cada día adquiere mayor importancia dentro de la sociedad ya que limita a una persona para poder desempeñar las actividades de la vida diaria (AVD). La Organización Mundial de la Salud (OMS) creó la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud (CIF) que define la discapacidad como la interacción entre una persona con alguna deficiencia o limitación con el entorno, este término incluye las deficiencias, limitaciones de actividad y restricciones para participar de manera activa con la sociedad^[1].

Según la OMS se estima que alrededor del 15% de la población mundial padece una condición de discapacidad, este porcentaje ha aumentado debido a las enfermedades crónicas, el envejecimiento y los accidentes automovilísticos^[2].^[3] Esta organización, en colaboración con la Sociedad Internacional de Prótesis y Órtesis (ISPO) reportaron que

alrededor del 0.5% de la población mundial requiere un sistema protésico y ortésico^[4].

Hoy en día, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó en el 2014 que cerca de 935 mil personas presentaba una condición de discapacidad. Además, en la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID) se estima que el 10.9% de la población tiene dificultad para mover o usar brazos o manos^[5].

B. Proceso de rehabilitación física y psicológica

El proceso de rehabilitación de una persona con amputación transhumeral está conformado por la interacción de diversas disciplinas, si bien es de vital importancia mantener los cuidados médicos que requiere una intervención ortopédica como la amputación, también es de extrema importancia el proceso de rehabilitación físico, acondicionamiento, preparación psicológica del paciente y de la familia, así como el proceso de adaptación al entorno; a este conjunto de intervenciones que preparan al paciente para el uso final de un dispositivo protésico se le conoce como “Proceso de Protetización”, el cual abarca desde la amputación realizada por los médicos hasta la colocación de la prótesis funcional que usará el paciente^[6]. Las actividades lúdicas permiten que el paciente pueda interactuar con el ambiente a través de su cuerpo brindando un dominio relativo de sí mismo con sensación de logro. Estas experiencias no solamente se tratan del juego y ocio, sino que gracias a las tecnologías que tenemos hoy en día, como las consolas de videojuegos o la realidad virtual podemos ayudar a los pacientes a tener una vista en tiempo real de sus movimientos en escenarios que le resulten atractivos y motivantes^[3].

C. Biorretroalimentación en la rehabilitación

La biorretroalimentación o biofeedback se considera como la obtención de conocimientos acerca de la ejecución de alguna parte de nuestro cuerpo que se puede generar mediante un instrumento que permite amplificar la información acerca de procesos corporales que con frecuencia no se perciben^[8]. Tecnologías como la RV, los videojuegos centrados en la terapia y los sistemas de biorretroalimentación, cada vez han adquirido mayor

importancia para impulsar la rehabilitación en las instalaciones clínicas y en el hogar^[9].

Dichas tecnologías utilizan el aprendizaje motor y las estrategias de reaprendizaje para acelerar el proceso de rehabilitación de la ejecución de un gesto motor. Un gran beneficio de los sistemas de biorretroalimentación, especialmente los sistemas portátiles, es la capacidad de proporcionar retroalimentación continua en tiempo real para reforzar los objetivos de fisioterapia protésica^[9].

D. Realidad Virtual en Rehabilitación

La Realidad Virtual (RV) se ha utilizado en diversas investigaciones relacionadas al entrenamiento protésico con el objetivo de restaurar las funciones en AVD a pacientes con limitaciones en miembros superiores. Estudios realizados^[10] han demostrado que la inmersión que experimentan los pacientes al utilizar un sistema de realidad virtual favorece las habilidades cognitivas y motoras, además permite al terapeuta controlar del entorno con el que interactúa el paciente y al mismo tiempo dar seguimiento a los avances de la adaptación que se tiene con la prótesis^[11].

E. Estado del arte de sistemas para entrenamiento en el uso de prótesis transhumeral utilizando RV

A lo largo de los últimos años el desarrollo de interfaces hombre-máquina ha adquirido cada vez mayor importancia buscando mejorar la calidad de vida de los usuarios y prestarle una mejor funcionalidad de su prótesis a la hora de realizar actividades de la vida diaria^[11].

Actualmente existen algunos sistemas de entrenamiento protésico en RV, un ejemplo es el desarrollado por la empresa Touch Bionics quienes desarrollaron un software para varios modelos de prótesis de la misma empresa (ultra revolution, ultra, digits y Access), este software se puede utilizar para entrenamiento y para rehabilitación mediante la selección de patrones de agarre y funciones de mano que se adapten mejor a las necesidades del paciente^[11].

La combinación de RV y el uso de dispositivos protésicos ha sido tema de estudio en los últimos años, por ejemplo, el modelo propuesto por Dupont y Morin en el cual se realizó un sistema de entrenamiento para la manipulación de una prótesis de mano controlada por la contracción muscular del paciente^[12]. Tsuji et al. desarrollaron un sistema que permite al paciente con amputación tener retroalimentación de la sensación de manipular una mano protésica^[12]. Asilbek Ganiev desarrolló un sistema que permite controlar un ambiente virtual mediante señales de electromiografía de superficie de un brazo robótico de 3 grados de libertad^[13]. Murray et al., diseñaron un sistema de realidad virtual que permite al paciente mover las extremidades utilizando un guante y sensores unidos al codo y muñeca protésicos^[14].

James Flint propone un dispositivo basado en una manga de silicón con sensores piezo-resistivos (FSR) que registra el movimiento del miembro residual el cual es adquirido mediante un código en LabVIEW y

posteriormente enviado a un software desarrollado en Java3D para RV^[15].

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema en Realidad Virtual que permita realizar un análisis biomecánico del movimiento de miembro superior y entrenar a amputados transmurales en el uso de la prótesis.

II. METODOLOGÍA

La realización de este proyecto se dividió en 2 etapas: 1) creación del entorno virtual para interactuar con el paciente en tiempo real y 2) modelado de objetos y personajes tridimensionales para ser utilizado dentro del entorno virtual.

1) *Creación de los entornos virtuales:* Durante la primera etapa se crearon dos entornos virtuales mediante el motor de videojuegos Unreal Engine 4.26 (Epic Games, Maryland, Estados Unidos), mismos que se visualizan a través del visor de Realidad Virtual Oculus Rift CV1 (Facebook, California, Estados Unidos). Dentro de los dos se colocó un personaje tridimensional para ser controlado en tiempo real por el sujeto.

2) *Modelado de objetos y personajes tridimensionales:* Dentro de la segunda etapa, se modelaron diferentes objetos siguiendo la metodología low-poly^[16] ya que esta metodología es óptima para que dichos objetos puedan ser utilizados dentro de un entorno de Realidad Virtual. El modelado de estos objetos en 3D se realizó mediante el software 3Ds Max 2019 (Autodesk Inc., California, Estados Unidos) en el cual se creó la malla tridimensional (mesh) de cada objeto y posteriormente se agregó un esqueleto básico a cada objeto para ser manipulado dentro del entorno virtual. Dentro de esta fase, también se modelaron 5 personajes tridimensionales masculinos y 4 femeninos con un esqueleto formado por 13 segmentos (asset bones), mismos que son controlados por el sujeto en tiempo real mediante un sistema de captura de movimiento. Con el objetivo de que los objetos brinden un aspecto real dentro del entorno virtual se diseñaron texturas de cada objeto mediante el software Photoshop 2021 versión 22.4.2 (Adobe Systems Incorporated, California, Estados Unidos), dichas texturas fueron proyectadas sobre los objetos dentro de los entornos virtuales. 3) *Control en tiempo real y análisis biomecánico:* Para obtener el movimiento del sujeto y que éste controle en tiempo real al personaje tridimensional se colocaron 39 marcadores pasivos en el sujeto siguiendo el modelo Plug-In Gait (Fig. 1) el cual establece la posición anatómica de los marcadores. El movimiento de dichos marcadores se obtuvo mediante 5 cámaras infrarrojas de 1 Megapixel Vicon Bonita (Vicon, Oxford, Reino Unido) y 9 cámaras de 5 Megapíxeles Vicon Vantage V5 (Vicon, Oxford, Reino Unido); posteriormente, dentro del software Vicon Nexus 2.11 (Vicon, Oxford, Reino Unido) se reconstruyó el movimiento de cada segmento del cuerpo

basado en la trayectoria de cada marcador pasivo. De igual manera, gracias al sistema de captura de movimiento se puede realizar un análisis biomecánico del movimiento de cada sujeto, donde se analizó el rango de movimiento de las articulaciones del hombro y del codo del sujeto.

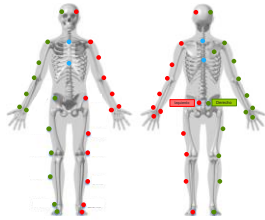


Fig. 1. Posición anatómica de los marcadores pasivos dentro del modelo biomecánico Plug-In Gait

El movimiento de cada segmento corporal se envió al software MotionBuilder 2019 (Autodesk Inc., California, Estados Unidos) donde se realizó un proceso de retarget para anclar en tiempo real el movimiento de cada segmento reconstruido por el sistema de captura de movimiento al *asset bone* correspondiente. El software de retarget envía en tiempo real el movimiento anclado al motor de videojuego Unreal Engine donde se ancló al personaje tridimensional y al entorno virtual desarrollado en la primera etapa, y de esta manera el sujeto pudo controlar este personaje en tiempo real y de igual manera el sistema de Realidad Virtual permitió que el sujeto tuviera un parámetro de biofeedback (Fig 2).

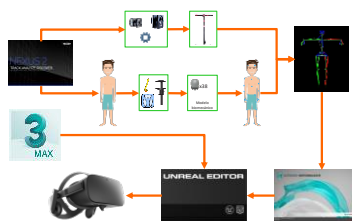


Fig 2. Diagrama de flujo de la interconexión entre sistemas, desde el sistema de captura de movimiento hasta el motor de videojuegos

III. RESULTADOS

A. Creación de los entornos virtuales

Se diseñaron dos entornos virtuales para permitir que el sujeto pueda seleccionar entre una opción realista y una opción de ciencia ficción, siendo que en la primera opción el sujeto tiene interacción con un entorno donde se simulan algunas áreas de una casa como la sala y el comedor, mientras que en la segunda opción el sujeto tendrá interacción con un entorno de ciencia ficción espacial (Fig 3). Dentro de ambos entornos el sujeto recibe biorretroalimentación mediante un visor de Realidad Virtual donde observa su propio movimiento.

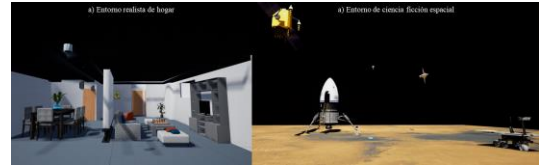


Fig. 3. Entornos virtuales creados: a) entorno realista de hogar y b) entorno de ciencia ficción espacial.

B. Modelado de asset y personaje tridimensional

Los personajes tridimensionales fueron creados modelando una malla 3D siguiendo la metodología low-poly, posteriormente se les adjuntó un sistema de huesos para ser controlado en tiempo real. A estos personajes también se les aplicó la textura diseñada para darle más realismo a dichos personajes (Fig 4).

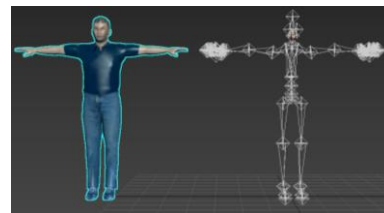


Fig. 4. Cada personaje animado cuenta con una malla low-poly y un sistema de huesos para poder ser controlado en tiempo real. Las texturas que se le aplican a cada personaje con para darle un mayor realismo.

El sujeto pudo elegir entre 8 variaciones de personajes tridimensionales, siendo 4 personajes masculinos y 4 personajes femeninos, dentro de los cuales se pudo elegir un personaje con una amputación transhumeral izquierda. Así mismo, cada personaje tiene 3 variaciones de estatura: 160cm, 170cm y 180cm (Fig 5).



Fig. 5. Variaciones de personajes entre los cuales puede elegir cada sujeto

Los objetos que se utilizaron dentro de cada uno de los entornos virtuales también fueron creados a través de modelar una malla 3D a la cual se le aplicó la textura de cada uno de los objetos, dando como resultado la posibilidad de interactuar con varios objetos en cada uno de los entornos virtuales (Fig 6)

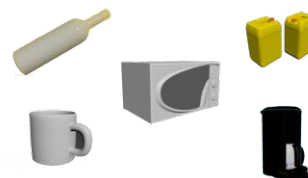


Fig. 6. Ejemplo de objetos 3D con los que puede interactuar el sujeto

C. Análisis biomecánico

Mediante el uso del sistema de captura de movimiento se realizó el control del personaje tridimensional en tiempo real y que permitió realizar un análisis biomecánico detallado de los rangos de movimiento de la principal articulación que se utiliza en el movimiento de la extremidad superior, siendo ésta el hombro. Para poder analizar el movimiento que realiza el sujeto se han generado los rangos de movimiento de flexión-extensión, abducción-aducción y circunducción de hombro (Fig. 7).

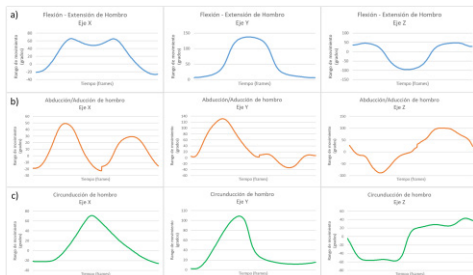


Fig. 7. Rango de movimiento del hombro, donde se observa a) flexión-extensión, b) abducción-aducción y c) circunducción

IV. DISCUSIÓN

Al día de hoy, los sistemas de rehabilitación para amputados de miembros superiores no permiten que los sujetos de rehabilitación puedan elegir un entorno y un personaje animado para interactuar, el hecho de brindarle estas posibilidad le brinda al sujeto una mayor motivación para concluir la terapia ya que puede llegar a considerar ésta como un entretenimiento personalizado, es por esto que la Realidad Virtual inmersiva cobra una gran relevancia dentro del proceso de rehabilitación para amputados.

Dentro de un proceso de rehabilitación la obtención de un análisis biomecánico de los principales segmentos o articulaciones que ejecutan el gesto motor permite que los terapeutas y médicos puedan personalizar los procesos de rehabilitación a cada sujeto, así como medir la progresión del mismo y sobre todo poder distinguir la manera en la que se ejecuta cada fase del gesto motor.

El uso del sistema de captura de movimiento, además de generar un análisis biomecánico, al unirlo con el sistema de Realidad Virtual permite que el sujeto reciba biorretroalimentación en tiempo real del movimiento que está ejecutando, además de integrar el entretenimiento al proceso de rehabilitación para que éste cada vez sea más atractivo para el sujeto y permita aumentar la tasa de conclusión de las terapias de rehabilitación.

V. CONCLUSIONES

Con el trabajo realizado durante este proyecto se brinda a los sujetos con amputación de miembro superior un

proceso de entrenamiento con el uso de su prótesis transhumeral recibiendo biorretroalimentación en tiempo real para que el mismo sujeto pueda analizar y perfeccionar su propio movimiento.

Este desarrollo, en un futuro, puede ser utilizado para diferentes niveles de amputación tanto de miembro superior como de miembro inferior y así le brinde a todos los amputados la posibilidad de recibir un proceso de rehabilitación personalizado combinado con los beneficios y ventajas de un sistema de simulación como la Realidad Virtual inmersiva, brindándole al sujeto un entrenamiento constante durante el proceso de entrenamiento en el uso de su prótesis.

RECONOCIMIENTO

Se extiende un gran agradecimiento al Laboratorio de Análisis de Movimiento del Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, al Instituto de Investigación Aplicada y Tecnología de la Universidad Iberoamericana CDMX y a la empresa HCG Technologies por todo su acompañamiento, consultoría y sobre todo por permitir que el proyecto se desarrollara dentro de sus instalaciones utilizando los diversos recursos tecnológicos con los que cuenta cada uno.

REFERENCIAS

- [1] OMS, «Discapacidad y Salud,» OMS, 2018. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/disability-and-health>. [Último acceso: 2018].
- [2] Organización Mundial de la Salud, «Informa mundial sobre la discapacidad,» Siuza, 2011.
- [3] U. Central, Propuesta para la Acción en Terapia Ocupacional, Santiago de Chile, 2012.
- [4] A. G. Cutti, A. Cappello y A. Dayalli, «In vivo validation of a new technique that compensates for soft tissue artefact in the upperarm: Preliminary results,» Clin. Biomech, vol. 21, n° 1, pp. 13-19, 2006.
- [5] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, «Censo de Población y Vivienda 2020,» Ciudad de México, 2020.
- [6] E. Vazquez Vela, Los amputados y su rehabilitación, un reto para el estado, México: Cademia Nacional de Medicina de México, 2016.
- [7] M. Hernandez Avila, J. P. Gutierrez y N. Reynoso Noveron, «Diabetes Mellitus en México. El estado actual de la epidemia,» Salud Pública México, vol. 55, n° 2, pp. 129-136, 2013.
- [8] S. A. Thomson, «Los usos de la biorretroalimentación en Psicoterapia,» Revista Latinoamericana de Psicología, vol. 15, n° 12, pp. 47-61, 1983.
- [9] R. Escamilla Nunez, A. Michelini y J. Andrysek, «Biofeedback Systems for Gait Rehabilitation of Individuals with Lower-Limb Amputation: A Systematic Review,» Sensors, vol. 20, n° 1628, pp. 1-26, 2020.
- [10] G. C. Burdea y P. Coiffet, «Virtual Reality Technology,» vol. 1, 2003.
- [11] J. C. Chico Moreno, «Desarrollo de prototipo de prótesis de mano emulada en un ambiente virtual,» Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2016.
- [12] A. C. Dupont y E. L. Morin, «A Myoelectric Control Evaluation and Trainer System,» IEEE Trans. Rehabil. Eng., vol. 2, n° 2, pp. 100-107, 1994.
- [13] A. Ganiev, H. S. Shin y K. H. Lee, «Study on virtual control of a robotic arm via a Myo armband for the self-manipulation of a hand amputee,» Int. J. Appl. Eng. Res., vol. 11, n° 2, pp. 775-782, 2016.
- [14] C. D. Murray, E. Patchick, S. Pettifer, F. Caillete y T. Howard, «Immersive Virtual Reality as a Rehabilitative Technology for Phantom

Limb Experience. A Protocol,» *CyberPsychology Behaviour*, vol. 9, nº 2, pp. 167-170, 2006.

[15] M. K. Grigore Burdea y J. F. William Craeluis, «Manipulation Practice for Upper-Limb Amputees Using Virtual Reality,» *Presence*, vol. 14, nº 2, pp. 175-182, 2005.

[16] N. L. Webster, «High poly to low poly workflows for real-time rendering,» *Journal of visual communication in medicine*, vol. 40, nº 1, pp. 40-47, 2017.