

# Aplicación de Inteligencia Artificial en un Videojuego Serio para la Rehabilitación de la Articulación del Codo

D. L. Aguilar Jiménez<sup>1</sup>, E. M. Santana Franco<sup>1</sup>, A. Villarreal Carrillo<sup>1</sup>, I. R. Aguilar Figueroa<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Electrónica y Computación, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México

<sup>2</sup>Biometría Aplicada, Ciudad de México, México

\*i.aguilar@biometriaaplicada.com

**Abstract**— The elbow joint is key in the functionality of the upper limbs and is used in many activities. In this sense, different pathologies and trauma can affect the Range Of Motion (ROM) and limit the patient's capabilities such as playing sports, eating, drinking, brushing teeth, among others. Due to the problems described above, a prototype video game was created in Python, which is controlled by flexion and extension movements of the elbow. OpenCV library and Mediapipe framework enabled image processing and the registration of the patient's movements in real time by means of the webcam. The final project can be used as a tool to ease the patient rehabilitation exercises using all the benefits from technology, such as low price and easy access. Likewise, the user could see and analyze their progress after every session.

**Palabras clave**—Articulación, Codo, Python, Rehabilitación, Videojuego.

## I. INTRODUCCIÓN

La articulación del codo es clave en el funcionamiento de las extremidades superiores y es utilizado en numerosas actividades de la vida diaria tales como practicar deportes, realizar tareas domésticas, comer, beber, lavarse los dientes, entre otros [1].

El complejo articular del codo está formado por tres articulaciones distintas: la articulación cúbito-humeral, de tipo bisagra, que permite la flexo-extensión; la articulación radio-humeral, una diartrosis de tipo condílea, que permite la rotación axial o pivotación así como la flexo-extensión; y la radiocubital proximal, en la que la cabeza del radio se aloja en la fosa radial del cúbito y se ve rodeada por el ligamento anular, que es una articulación de tipo trocoide y permite la pronosupinación [2].

El rango de movimiento (ROM, por sus siglas en inglés) generalmente se evalúa como el grado de máxima movilidad de una articulación específica en un plano particular de movimiento [3].

El ROM puede deteriorarse a cualquier edad como consecuencia de diversas causas: luxaciones; fracturas óseas; lesiones del plexo; contracturas de la piel debido a una quemadura; acortamiento muscular; contracturas de tendones o ligamentos, entre otros [3].

Las luxaciones de codo son bastante comunes, ya que representan del 11% al 28% del total de las lesiones, con una incidencia anual de 6 a 8 casos por cada 100 mil habitantes [4]. Asimismo, las fracturas del húmero

equivalen al 6.6% de todo tipo de fracturas [5]. Si a esto le sumamos el resto de las lesiones mencionadas anteriormente, tenemos un número considerable de pacientes afectados.

Una vez que se presenta este tipo de lesiones existen diferentes métodos para su recuperación. Uno de los más comunes son los ejercicios de flexión y extensión del codo cuya finalidad es recuperar el ROM estándar, reducir la rigidez articular y evitar la congelación.

Sin embargo, la implementación de estos ejercicios en terapias de rehabilitación puede resultar tedioso, repetitivo y poco motivante para el paciente. Por lo anterior, la incorporación de juegos serios para la salud en los programas de rehabilitación contribuye a atenuar estos inconvenientes.

El término de juegos serios para la salud se utiliza para describir los juegos cuyo objetivo principal no es el entretenimiento, sino la educación o la formación [6, 7]. Por ejemplo, se pueden diseñar juegos serios para capacitar a profesionales de la salud, y para aplicar en procesos de rehabilitación en los que se requiere reproducir tareas repetitivas por parte del paciente [8].

También están dirigidos para incrementar la motivación de los pacientes en tres áreas: impulsar a los pacientes a que aprendan los pormenores de su enfermedad y su tratamiento, utilizarlos como herramienta de distracción durante la terapia para el dolor y la ansiedad, y animar a los pacientes a continuar con su tratamiento durante periodos más largos [9].

De acuerdo con la problemática descrita, se diseñó un prototipo de videojuego serio para la salud haciendo uso de visión computacional y *Machine Learning (ML)*, en el lenguaje de programación Python con la finalidad de apoyar en la rehabilitación del codo. El videojuego desarrollado tiene como objetivo incentivar al paciente a realizar su sesión de ejercicios a través de un medio interactivo que sea divertido y amigable, además de permitirle conocer sus avances, ya que cuenta con un sistema de monitoreo.

## II. METODOLOGÍA

En esta sección se explica el proceso llevado a cabo para la realización de nuestro prototipo, el cual se dividió en cuatro fases, que son las siguientes:

### A. Detección de articulaciones

En esta primera fase del proyecto se utilizó la librería *OpenCV* de Python y el framework *MediaPipe* de Google. La primera de ellas se encargó del procesamiento de imágenes, el cual hizo posible el registro de los movimientos del paciente en tiempo real por medio de la cámara web. Su aplicación brinda muchas ventajas, ya que permite ejecutar el proceso de rehabilitación de manera menos invasiva y costosa, además, a distancia, ya que únicamente se necesita un dispositivo que sea capaz de correr el juego.

*MediaPipe* es un *framework* de código abierto para la construcción de redes de procesos de datos conectados en serie de modelos de *ML* para realizar inferencia sobre datos, visión computacional y procesamiento multimedia (por ejemplo, decodificación de vídeo).

Para el seguimiento de la postura corporal de alta fidelidad, *MediaPipe* infiere 33 puntos de referencia 3D en todo el cuerpo a partir de cada una de las imágenes de vídeo RGB utilizando la investigación *BlazePose*, que también impulsa la API de detección de la postura *ML Kit*. Los enfoques actuales del estado de la técnica se basan principalmente en potentes entornos de escritorio para la inferencia, de esta manera este método logra un rendimiento en tiempo real.

Utilizando un detector, la línea de producción localiza primero la región de interés (ROI, por sus siglas en inglés) de la persona/postura dentro de la imagen. A continuación, el rastreador predice los puntos de referencia de la postura dentro de la región de interés utilizando la imagen recortada de la región de interés como entrada. Teniendo en cuenta que, en los casos de uso de vídeo, el detector sólo se invoca cuando es necesario, es decir, para el primer fotograma y cuando el rastreador ya no puede identificar la presencia de la pose del cuerpo en la imagen anterior. Para el resto de las imágenes, la línea de producción simplemente deriva la ROI a partir de los puntos de referencia de la pose de la imagen anterior.

### B. Cálculo del ángulo deseado

Una vez que se obtuvieron los puntos en todas las articulaciones fue necesario localizar las coordenadas que son de nuestro interés, en este caso son el hombro, codo y muñeca. Para el desarrollo de este videojuego se calculó únicamente el ángulo existente, en grados sexagesimales, entre las articulaciones de hombro, codo y muñeca, es decir, el ángulo  $\alpha$  mostrado en la Fig. 1.

Se decidió calcular el ángulo  $\alpha$  ya que éste es mostrado en una pantalla extra al videojuego, dicha pantalla permite al usuario observarse a sí mismo durante la ejecución del juego, ser consciente de sus movimientos y que el videojuego sea de fácil uso. El cálculo del ángulo  $\alpha$  se realizó como se describe a

continuación. Las variables y ecuaciones siguientes surgen de la Fig. 1.

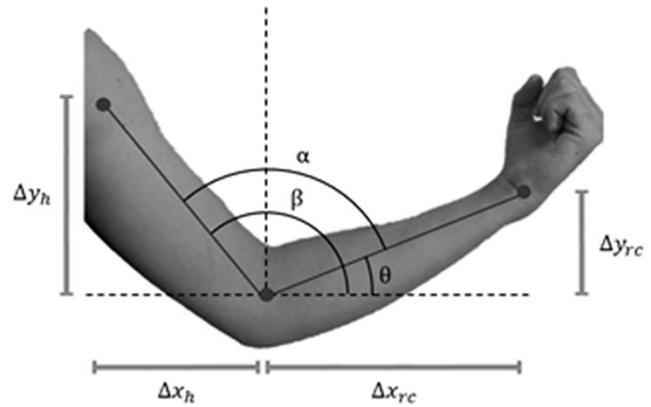


Fig. 1. Ángulos de la articulación del codo.

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta y_h}{\Delta x_h}\right) \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y_{rc}}{\Delta x_{rc}}\right) \quad (2)$$

$$\alpha = \beta - \theta \quad (3)$$

En donde  $\beta$  es el ángulo del húmero y  $\theta$  es el ángulo del radio y cúbito, que restarse obtenemos  $\alpha$  nuestro ángulo de interés, es decir, el ángulo de la apertura del codo. Asimismo,  $\Delta y_h$  e  $\Delta x_h$  son los incrementos del húmero, de manera análoga,  $\Delta y_{rc}$  e  $\Delta x_{rc}$  representan los incrementos del radio y del cúbito.

### C. Ajuste de ángulos

Debido a que el ángulo de la articulación del codo es calculado utilizando estimaciones de posiciones de segmentos corporales, es necesario corroborar que el ángulo obtenido sea lo más exacto posible. Por lo anterior, se realizó un análisis estadístico entre dos grupos de ángulos: los obtenidos por un goniómetro y los calculados por *MediaPipe*.

Dicho análisis consta del cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio (4) (RMSE, por sus siglas en inglés), y posteriormente se realizó una regresión lineal para ajustar los ángulos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (4)$$

En donde  $n$  es el número de muestras o ángulos que comparamos,  $y_j$  es el ángulo real (obtenido por un goniómetro) mientras que  $\hat{y}_j$  es el valor obtenido por medio *MediaPipe*.

### D. Creación de la interfaz

El algoritmo de la interfaz se realizó en Python por medio de Programación Orientada a Objetos (POO) para hacer más eficiente su realización. Además, se utilizó la

librería llamada *Pygame* que cuenta con todas las funciones necesarias para la creación de un juego.

Al ejecutar el videojuego se despliega un menú, donde se le permite al usuario escoger cuál de los dos miembros superiores se desea rehabilitar. Una vez seleccionado el brazo a estimular, el juego comienza.

Se crearon únicamente tres objetos: el jugador, un enemigo y el elemento que suma puntos. El jugador se traslada únicamente de manera vertical. El movimiento del jugador fue definido por el ángulo obtenido en la fase anterior el cual le indica al jugador si sube o baja y estos umbrales deben ser ajustados según cada paciente. Los otros dos objetos se trasladan por el eje horizontal y su posición vertical es generada de manera aleatoria.

La dinámica del juego es muy sencilla, el jugador sube y baja por la pantalla atrapando elementos que se van sumando en una puntuación, mientras evita a los enemigos que le restan vidas. El jugador cuenta con tres vidas al comenzar el juego y este termina cuando se agotan las mismas.

Cuando el juego llega a su fin, se muestran los ángulos, máximo y mínimo obtenidos durante la sesión, que podemos traducir como el ángulo mayor de extensión y de flexión respectivamente.

Cabe señalar que los gráficos de la interfaz fueron obtenidos en bancos de imágenes, que brindan las licencias para sus usos, y escogidos para que fueran atractivos para los pacientes y los motivaran a continuar con su terapia.

Finalmente, se implementó un sistema de seguimiento que, al terminar el juego, recopila en un archivo CSV datos sobre la sesión de terapia, que son fecha y hora de realización, duración de ésta, brazo estimulado, así como el ángulo máximo y mínimo alcanzado por el paciente.

### III. RESULTADOS

El prototipo de videojuego para rehabilitación de la articulación del codo, que es controlado por medio del ángulo formado en la unión del húmero, radio y cúbito, brinda la posibilidad de rehabilitar ambos miembros superiores, eligiendo desde la pantalla de inicio, como se puede observar en la Fig. 3.

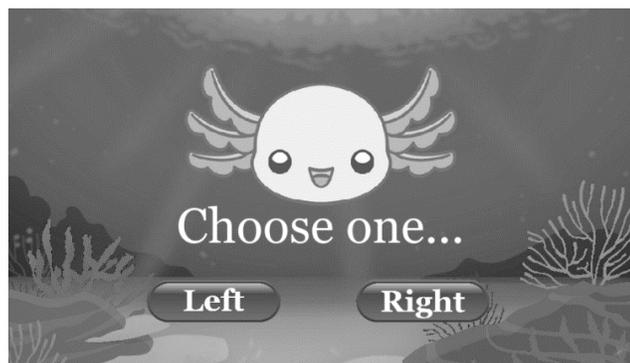


Fig. 3. Pantalla de inicio.

El juego cuenta con una interfaz en donde el usuario puede visualizar en la parte de arriba su puntuación y las vidas que tiene disponibles, además al personaje que se mueve en tiempo real de acuerdo con el ángulo registrado por la cámara, como se puede ver en la Fig. 4.



Fig. 4. Juego en funcionamiento.

Durante el proceso de rehabilitación, el paciente puede observarse a sí mismo realizando los movimientos de flexión y extensión que son los controles del juego y, además, la transición del ángulo de interés, como se ilustra en la Fig. 5. Sin embargo, el ángulo observado en pantalla no es registrado y únicamente se registran los ángulos máximos.

Es importante mencionar que, mediante la realización del análisis estadístico a partir de los datos de la Fig. 6, se obtuvo un RMSE de  $4.7^\circ$ . Para aminorar este error, se calculó una regresión lineal, cuya ecuación resultante permitirá hacer más exacto el ángulo obtenido por el framework Mediapipe. El símbolo del ángulo ajustado es  $\omega$ .

$$\omega = 1.00351323 * \alpha - 0.31619076 \quad (5)$$

Al terminar cada sesión, podemos ingresar al archivo CSV en donde se puede verificar el avance del paciente en cada una de sus sesiones y cómo sus ángulos máximos de flexión y de extensión van aumentando y se van acercando cada vez más al ROM estándar, como se observa en la Tabla 1. También se le muestra al usuario los ángulos máximos y mínimos, junto con su puntuación.

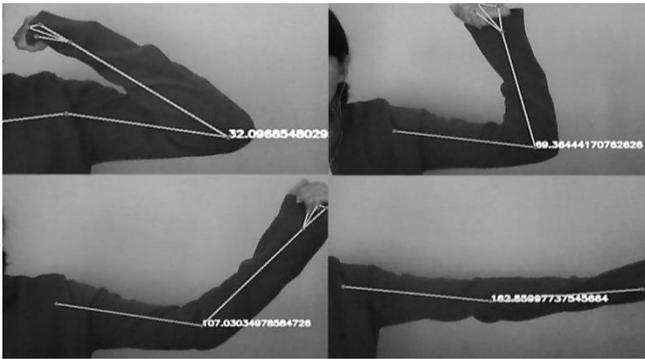


Fig. 5. Transiciones angulares.

Tabla 1: Archivo CSV de seguimiento.

Fecha	Duración (s)	Brazo	° Min.	° Máx.
03/07/21 11:30	124.87	Izq.	26.46	176.29
04/07/21 14:12	154.53	Der.	33.95	173.54

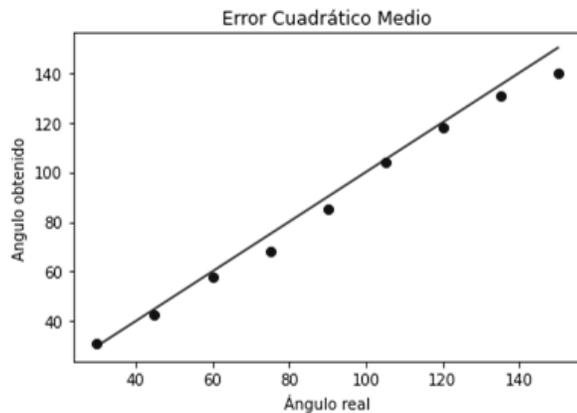


Fig. 6. Error cuadrático medio

#### IV. DISCUSIÓN

Al tratarse de un prototipo de videojuego, que aún no ha sido probado en el ambiente clínico, es necesario implementarlo en pacientes para evaluar su desempeño. De igual forma, calcular los umbrales necesarios de flexión y extensión máxima, específicos para cada paciente y que vayan aumentando progresivamente con el paso de las sesiones. Por último, la eficiencia del videojuego podría mejorarse monitoreando la posición del paciente y la ejecución correcta de los ejercicios.

No obstante, este prototipo puede ser una herramienta que contribuya a que la rehabilitación sea menos invasiva y costosa; que pueda ser a distancia debido a los pocos requerimientos para su uso, y que permita, además, que el paciente realice sus ejercicios desde la comodidad de su hogar.

El método propuesto puede efectuar un rastreo rápido sin el uso de marcadores o dispositivos externos colocados en el brazo del paciente. Esto se realiza en tiempo real, ya que aprovecha los beneficios que nos brinda *Mediapipe* con sus detecciones exactas, que están hechas por medio de *ML*.

Finalmente, este videojuego ofrece al paciente una

alternativa para realizar sus ejercicios de rehabilitación más accesible y le permita estar consciente de sus avances.

#### V. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó un prototipo cuyo objetivo es servir como herramienta o complemento durante la rehabilitación. Éste pretende utilizar algunas de las ventajas brindadas por las nuevas tecnologías, además de reducir los costos para que la atención médica (de rehabilitación) pueda beneficiar a muchas más personas.

A diferencia de otros proyectos similares, la unión de un juego serio de la salud con herramientas como el framework *Mediapipe*, permite que se realicen detecciones exactas; se produzca información para que se mantenga actualizado, y debido a que utiliza la tecnología de *ML* se mantendrá relevante por más tiempo.

Es un proyecto que cuenta con el potencial para seguir creciendo, ya que, tiene una ventana muy amplia de posibles mejoras entre ellas: agregar una base de datos para llevar el control de los datos del paciente y así mismo almacenar mayor información durante la sesión; agregar mayor variedad de ejercicios y un control de monitoreo para la correcta forma de dichos ejercicios; entre otras.

#### RECONOCIMIENTO

En nombre de los autores, expresamos nuestro agradecimiento públicamente al Maestro Isaac Rene Aguilar Figueroa, por instruirnos de manera efectiva, remarcar nuestros errores pasados para mejorar como estudiantes y por ser tan profesional en nuestra formación académica.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Rosdiyana, A. B. Muhammad, P. Dwi, M. Mahfuzah, H. A. Nor, "Elbow Flexion and Extension Rehabilitation Exercise System Using Marker-less Kinect-based Method", *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 7, no. 3, pp. 1602-1610, June, 2017, DOI: 0.11591/ijece.v7i3.pp1602-1610
- [2] P. G. Andrea *et al.* "Anatomía del codo para el cirujano artroscopista", *REVISTA ESPAÑOLA DE ARTROSCOPIA Y CIRUGÍA ARTICULAR*, vol 25. no. 63, pp. 91-102, September, 2018. Accessed on: July, 12, 2021, DOI: 10.24129/j.reaca.25263.fs1801002, [Online].
- [3] A.M Oosterwijk, M.K Nieuwenhuis, C.P van der Schans & L.J Mouton, "Shoulder and elbow range of motion for the performance of activities of daily living: A systematic review". *Physiotherapy Theory and Practice*, vol. 34. no. 7, pp. 505-528, January, 2018. Accessed on: July, 13, 2021, DOI:10.1080/09593985.2017.142220, [Online]
- [4] I. Luis, *et al.*, "LAS ENFERMEDADES Y TRAUMATISMOS DEL SISTEMA MÚSCULO ESQUELÉTICO. UN ANÁLISIS DEL INSTITUTO NACIONAL DE REHABILITACIÓN DE MÉXICO, COMO BASE PARA SU CLASIFICACIÓN Y PREVENCIÓN." Country: Mexico 2012, pp. 5-11.
- [5] C. J. Shrikant, S. Mike, "Rehabilitation of elbow trauma", *Hand Clinics*, vol. 20, no. 4, pp. 363-374. November 2004, DOI: 10.1016/j.hcl.2004.06.004

- [6] G. Stefan, M. Ralph, "Serious Games for Health: The Potential of Metadata". GAMES FOR HEALTH JOURNAL: Research, Development, and Clinical Applications. vol. 6, no. 1, pp. 49-56, February 2017. Accessed on: July, 14, 2021, DOI: 10.1089/g4h.2016.0034, [Online].
- [7] P. P. João, Q. Cláudia, V. Pedro, "Serious games for upper limb rehabilitation: a systematic review", Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, vol. 13, no. 1, pp. 95-100, January, 2017. Accessed on: July, 16, 2021, DOI: 10.1080/17483107.2017.1290702, [Online].
- [8] W. Voravika, B. Imma, G. Rubén, S. Mateu, "Serious games for health", Entertainment Computing, vol. 4, no. 4, pp. 231-247, October, 2013. Accessed on: July, 14, 2021. DOI: 10.1016/j.entcom.2013.09.002
- [9] W. Carolyn, *et al*, "Extending the Use of Games in Health Care", Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences, vol. 5, pp. 88b-88b, January, 2006. Accessed on: July, 16, 2021. DOI: 10.1109/HICSS.2006.179, [Online]