

Sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos

Biomechanical System for Sports Reflex Training

Tania Fernanda **Mata Bernal**¹, Jareth Israel **Rivera Pineda**², Miguel **Vázquez González**³,
César **Ponce de la Fuente**⁴, Sergio Alberto **Navarro Tuch**⁵, Luis Antonio **Aguilar Pérez**⁶

Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Santa Fe, Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0006-1416-1376

² ORCID: 0009-0007-7615-0629

³ ORCID: 0009-0001-8341-7498

⁴ ORCID: 0009-0003-1419-3683

⁵ ORCID: 0000-0002-3551-7689

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, MÉXICO

⁶ ORCID: 0000-0002-7051-0001 | laguilarpe@comunidad.unam.mx

Recibido 05-06-2024, aceptado 25-07-2024.

Resumen

En el ámbito deportivo, la mejora de los reflejos se considera un componente crucial durante el entrenamiento. Para ello, se utilizan diversas herramientas tecnológicas para entrenar la capacidad de reacción ojo-mano, una capacidad comúnmente asociada a los reflejos de un atleta. Los dispositivos utilizados para estas tareas se basan principalmente en sistemas de iluminación controlados de manera remota, combinados con sensores táctiles electrónicos. Sin embargo, algunos de estos sistemas presentan limitaciones físicas en términos de la estimación del tiempo de reacción del atleta. Por lo tanto, se desarrolló un sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos mediante el diseño de un robot Core XY que implementa un sistema electromecánico y de visión para controlar sus movimientos. Este dispositivo utiliza el análisis de video digital en tiempo real del área de juego, lo que permite el análisis biomecánico de las características asociadas al movimiento del atleta. El control de este manipulador robótico mueve un señuelo que el atleta debe seguir para entrenar progresivamente la precisión, velocidad y exactitud de sus movimientos. El efector final es identificado utilizando una cámara que observa constantemente los movimientos realizados, registrando los movimientos localmente en una tarjeta de desarrollo Raspberry PI para su posterior análisis. El diseño de este sistema permite un espacio de trabajo escalable y adaptable a diversas disciplinas. Todo el sistema fue simulado dentro del entorno de programación MATLAB-SIMULINK utilizando el módulo SIMSCAPE MULTIBODY para estimar los parámetros discretos de la función de transferencia de la cinemática de movimiento del manipulador robótico Core XY. En pruebas controladas, se encontró que la detección de movimiento del carrito aún se encuentra altamente influenciada por la luz ambiental. Por lo tanto, las futuras modificaciones del sistema pretenden abordar este problema. Este sistema ofrece una solución precisa para el entrenamiento de los reflejos en atletas, proporcionando un enfoque más exacto y potencialmente transformando la manera en que los entrenadores y atletas desarrollan habilidades de reacción en sus alumnos.

Palabras clave: biomecánica deportiva, mecatrónica, visión por computadora

Abstract

In the sports field, the improvement of reflexes is considered a crucial component during training. Various technological tools are used to train the eye-hand reaction ability, a capacity commonly associated with an athlete's reflexes. The devices used for those tasks are primarily based on remotely controlled lighting systems, combined with electronic touch sensors. However, some of these systems present physical limitations in terms of the time reaction estimation. Therefore, a biomechanical system for sports reflex training was developed through the design of a core XY Robot that implements the electromechanical and vision system to control their movements. This device uses a real-time digital video analysis, which allows the analysis of characteristics associated to the athlete's movement. The control of this robotic manipulator moves a lure that the athlete must follow to progressively train precision, speed, and accuracy of movement. The end effector is identified using a camera that constantly observes the movements made, recording the movements locally on a Raspberry PI development board for subsequent analysis. The design of this system allows for a scalable workspace adaptable to various disciplines. The entire system is simulated within the MATLAB-SIMULINK programming environment using the SIMSCAPE MULTIBODY module to estimate the discrete parameters of the transfer function of the Core XY robotic manipulator's motion kinematics. In controlled tests, it was found that the movement detection of the cart is highly influenced by ambient light. Therefore, future modifications of the system aim to address this issue. This system offers a precise solution for training reflexes in athletes, providing a more accurate approach and potentially transforming the way coaches and athletes develop reaction skills in trainees.

Index terms: sport biomechanics, mechatronics, computer vision..

I. INTRODUCCIÓN

La coordinación ojo-mano es un proceso complejo que requiere la activación precisa de los sistemas neuromotores en el cerebro del atleta. En particular, esta coordinación depende mayormente de la cooperación entre el córtex y el cerebelo. Para lograr esta coordinación, asociada a movimientos precisos, como alcanzar y agarrar objetos pequeños, es de suma importancia la adquisición de información visual de alta calidad y del control neuromotor simultáneo de los ojos y las manos [1]. Por ejemplo, en el estudio presentado por [2] se utilizó el sistema de salud interactivo Hot Plus, el cual es un sistema diseñado para simular un entorno del mundo real, proporcionando retroalimentación visual inmediata a los usuarios mediante la proyección de imágenes mediante un proyector sobre una superficie. En particular, este sistema ofrece desafíos a sus usuarios que indirectamente prueban las habilidades cognitivas y motoras de la persona, estimulando la coordinación neuromotora, la capacidad de respuesta y el control de movimientos promoviendo la coordinación entre el cerebro y el cuerpo. La coordinación neuromotora de los miembros superiores es crucial para la ejecución de movimientos en deportes que requieren respuestas rápidas y precisas, tales como el tenis, el béisbol y las artes marciales. Esta habilidad permite a los atletas procesar rápidamente la información visual y coordinar sus movimientos en consecuencia, mejorando así su rendimiento general. El trabajo presentado por [3] analiza de manera sistemática algunos de los principales esfuerzos realizados para poder entrenar la coordinación mano ojo en entornos deportivos desde 1950 a 2023. Entre los principales señalamientos que realiza este trabajo señala que mayormente se busca mejorar el rendimiento del sistema visual, por lo que el uso de dispositivos tecnológicos puede ayudar a la recuperación y en su caso el mejoramiento de la capacidad neuromotora del atleta. También destaca que muchos de los trabajos analizados carecen de grupos de control replicables en otros entornos por lo que es necesario establecer una prueba estandarizada que mida el rendimiento del atleta de manera replicable. Esto lo atribuyen por ejemplo a que los estudios analizados tenían un tamaño de muestra que no es estadísticamente significativo, o que no era correctamente definido el grupo de control durante las pruebas. Así mismo, los autores señalan durante los reportes estudiados existía una considerable variabilidad entre las técnicas y tratamientos utilizados entre los participantes de los estudios por lo que no se podía replicar una prueba estandarizada que permita medir correctamente el rendimiento de esta característica, concluyendo que la evaluación de los reflejos ha sido complicada de estudiar por distintas disciplinas deportivas, aunque no omiten señalar que independientemente del estudio, la gran mayoría de los atletas ha reportado que sí notan una mejoría entre realizar el entrenamiento personalizado de los reflejos.

Por ejemplo, el estudio titulado “Visual-Motor Response Times in Athletes and Non Athletes” sugiere que los tiempos de respuesta visual-motora no presentan diferencias significativas entre deportistas de alto rendimiento y aquellos que practican por diversión, señalando la influencia de otras variables como la anticipación y la búsqueda visual del objetivo [4]. Otros estudios en el campo destacan igualmente la importancia de las habilidades visuales y el rendimiento neuromotor, sugiriendo que estas pueden transferirse desde otras actividades a rendimientos deportivos específicos [5]. La coordinación mano-ojo, los tiempos de reacción y la visión periférica espacial son fundamentales y permiten fortalecer las capacidades del atleta durante la práctica deportiva [6]. Además, programas de entrenamiento neurocognitivo han demostrado que se puede optimizar la percepción visual, el procesamiento de la información y la toma de decisiones por el deportista, mejorando variables personalizadas asociadas al tiempo de reacción y la efectividad de respuesta durante la práctica de la disciplina [7].

El uso de tecnologías aplicadas a la biomecánica deportiva, como el uso de sensores portátiles y sistemas de captura de movimiento entonces resulta esencial para la mejora del rendimiento del atleta. Estos dispositivos permiten medir variables en tiempo real y corregir técnicas de movimiento ineficientes o riesgosas [8]. Sin embargo, aún persiste la necesidad de un modelo integrador que analice las métricas relacionadas con la influencia de las cargas externas al atleta, así como también algún estándar que permita evaluar el rendimiento biomecánico del atleta junto a sus tiempos de reacción [9]. El rendimiento visual y sensorial también puede afectar significativamente la capacidad de reacción ante impactos en la cabeza sufridos debido a la práctica

deportiva. Estudios indican que una mejor anticipación a este tipo de eventos podría reducir la severidad causada por estos, sugiriendo que la integración de tecnologías para la evaluación y entrenamiento visual podría ser clave en la mejora del rendimiento del atleta y la reducción del riesgo de lesiones debido a la práctica del deporte [10]. Aunque algunos estudios no señalan directamente las diferencias significativas entre grupos de estudios entrenados con estímulos visuales controlados, la evidencia práctica sugiere que este tipo de entrenamiento sí puede mejorar el tiempo de reacción y la función cognitiva [11].

8

La anticipación, así como el rendimiento visual y sensorial juegan un papel crucial en la reducción del riesgo de conmociones cerebrales debido a un pobre desempeño en la práctica deportiva del atleta. En la actualidad existen programas de entrenamiento visual como el Nike Sparq Sensory Station [12] que podrían ser efectivos para mejorar estas habilidades sobre todo al disminuir la tasa de conmociones en jugadores de fútbol americano [13]. El sistema FITLIGHT® es otro sistema similar a nivel comercial por ejemplo utiliza luces inalámbricas y programas de entrenamiento patentados para desafiar a los usuarios con tareas que permiten mejorar el tiempo de reacción, la precisión mental, el procesamiento sensorial y otros atributos neurocognitivos, siendo utilizado para mejorar estas habilidades en jugadores de baloncesto [14]. Pérez-Castilla en [15] examina distintos avances tecnológicos que han impulsado la biomecánica deportiva mediante métodos y técnicas de análisis y procesamiento de datos. Como se observa en estos trabajos, el uso de tecnologías portátiles con sensores fisiológicos permite una adquisición precisa y no invasiva de signos vitales, proporcionando retroalimentación objetiva sobre el rendimiento y estado de salud del atleta [16]. El entrenamiento de la visión deportiva también ha demostrado mejoras significativas en habilidades visuales y rendimiento deportivo, sugiriendo que la repetición y la práctica pueden llevar a adaptaciones a largo plazo en el sistema visual [17]. Finalmente, técnicas avanzadas de entrenamiento visual utilizando tecnología digital, como la realidad virtual y programas de aprendizaje perceptual, se integran en actividades de entrenamiento para mejorar la capacidad de procesar y responder a estímulos visuales en contextos deportivo [18].

En conjunto, los sistemas comerciales de entrenamiento de reflejos deportivos han demostrado que poseen limitaciones físicas principalmente en cuanto a la construcción y dependencia de la transmisión de datos, por lo que la precisión y eficacia presentada en las rutinas de entrenamiento mayormente dependerá de la capacidad del envío de la información desde el dispositivo al centro de mando, así como de la posición estática en la que estos sean colocados. Frente a esta carencia en la capacidad de los sistemas de estandarizar el movimiento para estimar el impacto que el entrenamiento de los tiempos de reacción de los atletas pueda generar en posiciones aleatorias dentro del espacio de trabajo real de la persona, se propone la implementación de la metodología QFD enfocada al diseño de productos para el diseño de un sistema mecatrónico mediante el cual se puedan estudiar los parámetros biomecánicos de un atleta, y con esto proponer en trabajos futuros un conjunto de variables que permitan estandarizar las pruebas biomecánicas para sistemas de entrenamiento de reflejos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del proyecto propuesto, el sistema tiene como población objetivo el ser usado por personas deportistas de tenis de mesa, por lo que podría ser utilizado por personas de cualquier rango de edad o género. En la Fig. 1 se presenta el diagrama de necesidades propuesto. Para definir las especificaciones técnicas y funcionales del sistema a desarrollar, se utilizó un diagrama QFD (Quality Function Development). En él, se definieron los requerimientos funcionales del sistema (horizontal) y los requerimientos del cliente (vertical). En el espacio central se definieron las relaciones de los requerimientos unos con otros, siendo 9 el más alto y 1 el más bajo. A partir de su definición, en la parte inferior, se calculó la importancia que tiene cada requerimiento funcional y en base a su importancia, se tomara como prioridad su desarrollo.

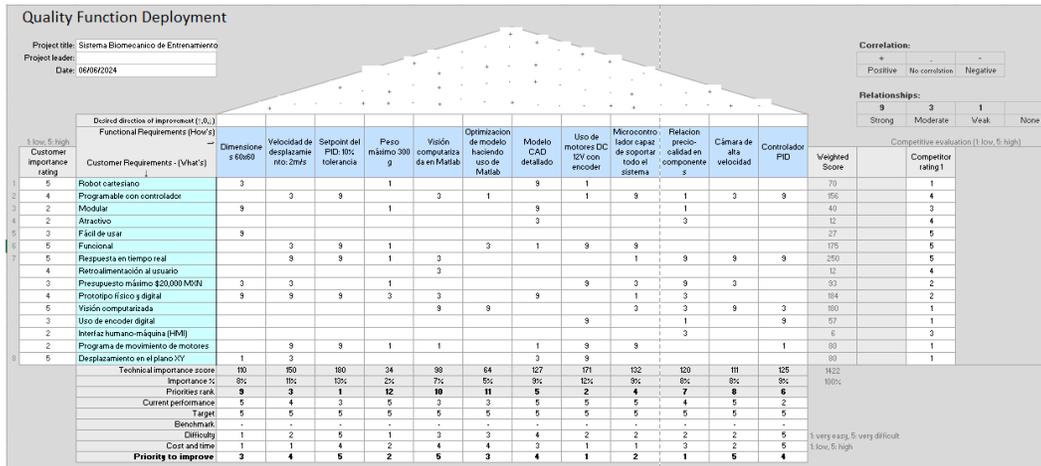


Fig. 1. Diagrama QFD para la evaluación del proyecto en términos de las necesidades del sistema de entrenamiento de reflejos propuesto.

Una vez terminado el análisis, se llegó a la conclusión de que los motores tengan una tolerancia del Set-Point de 10%, es decir que lo más importante es enfocar la atención al desarrollo de esta parte durante la construcción del proyecto. Por su parte, el aspecto que menos importancia tiene en el proyecto es el peso del sistema, esto implica que no se tenga que cuidar este aspecto, sin embargo, el proyecto no se tiene que basar principalmente en este requerimiento para su desarrollo. Una vez definida esta parte, el árbol de funciones es una herramienta crucial en la etapa inicial de planificación y diseño. Las razones clave por las cuales es de suma importancia son que genera claridad y comprensión, ayuda a identificar requisitos y objetivos, facilita la asignación de responsabilidades, eficientiza la estimación de recursos y simplifica la gestión del proyecto. En la Fig. 2, se muestra el árbol de funciones utilizado en este proyecto.

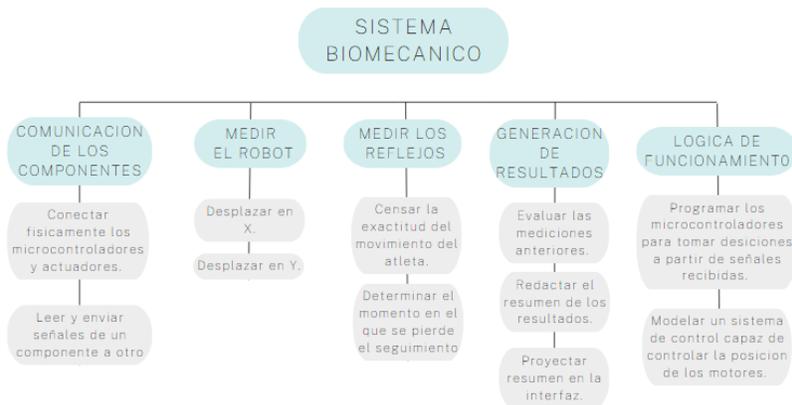


Fig. 2. Árbol de funciones.

Por su parte, en la Fig. 3 se muestra el diagrama de conexiones de los componentes electrónicos del sistema, estos son: un Raspberry Pi 3B+ y un Arduino UNO como los principales microcontroladores, dos motores DC 12V 1000 rpm con encoder, un puente H L298N, un módulo de cámara V2 de Raspberry, una LCD 4x20, un voltaje reductor 12V a 5V, y una fuente de poder de 12V/5A. El Raspberry y el Arduino están conectados mediante un cable serial, el cable va desde la entrada de voltaje del Arduino hasta un puerto USB del Raspberry. Las salidas de los motores DC están conectadas directamente a los puertos de entrada del Arduino, mientras que el suministro de 12V proviene del puente H y las señales tanto PWM como de dirección provienen de los

5

puertos de salida del mismo puente H. El puente H a su vez, obtiene voltaje directo de la fuente de poder. El Raspberry obtiene su fuente de poder a través del voltaje reductor y este a su vez está conectado a la fuente de poder de 12V. La cámara está conectada a la tarjeta madre del Raspberry en el puerto CSI de cámara. Por último, la LCD funciona con 8 bits, los cuales provienen de 8 GPIO pins del Raspberry, además se regula el contraste e iluminación por medio de los puertos de salida del Raspberry, también tiene entradas de 5V y tierra, las cuales provienen directamente del Raspberry.

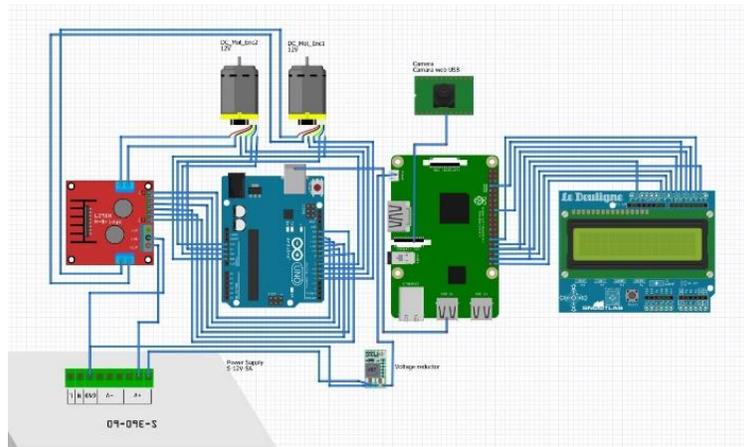


Fig. 3. Diagrama de conexión de componentes electrónicos.

Para el diseño mecánico, se realizó un modelo CAD del sistema, con todos los elementos mecánicos que cuentan con algún grado de libertad y la base superior en la que estarán fijados los elementos mecánicos y la cámara. En la Fig. 4 se muestra el robot cartesiano tipo Core XY armado.



Fig. 4. Prototipo de entrenador biomecánico para reflejos deportivos.

Se caracterizaron los motores del sistema y se definió una ecuación general para conocer cómo funciona el sistema de control de cada motor y así conocer cuál es su salida en función a la entrada de voltaje aplicada. En la Fig. 5a se muestra el sistema de control propuesto. En la Fig. 5b se muestra el esquema de modelo del sistema. En este modelo del sistema, la variable L corresponde a la inductancia de la armadura del motor, R a la resistencia de la armadura, $v(t)$ corresponde al voltaje aplicado, mientras que $i(t)$ corresponde a la corriente del motor. Por su parte en el sistema mecánico, J corresponde a la inercia que debe mover el motor, que en este caso está representada por la cuerda y la masa que debe mover del señuelo. B por su parte corresponde con el

coeficiente de amortiguamiento, es decir la fricción dinámica entre la cuerda y el sistema de giro. Finalmente, las variables K_m y K_a representan los coeficientes de conversión mecánico eléctrico y eléctrico mecánico.

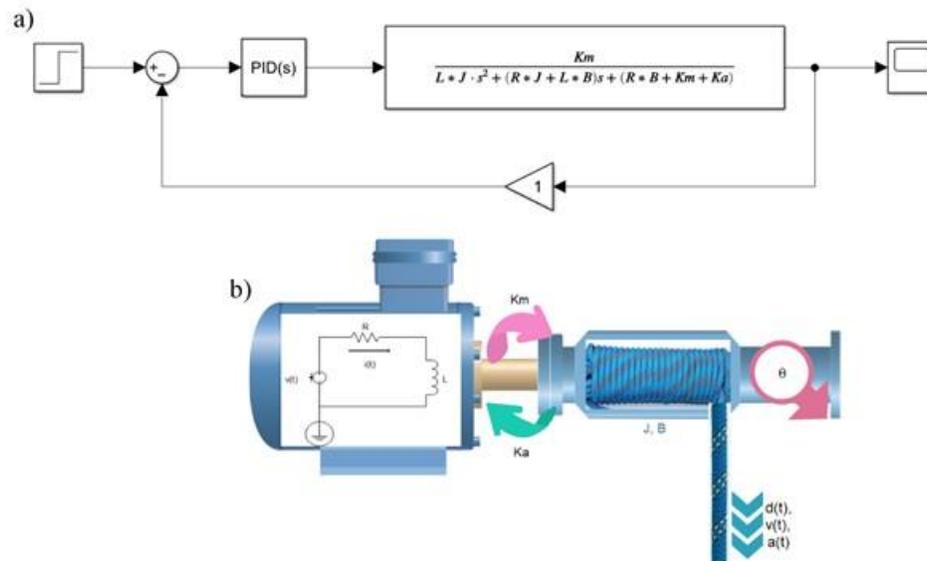


Fig. 5. Esquema de control de la función de transferencia de la planta a) Función de transferencia en lazo cerrado, b) Parámetros del modelo del sistema electromecánico.

Una vez obtenido el esquema de control, se hizo un modelo de SimScape, el cual replica el CAD realizado y le permite simular movimientos controlados a partir de los grados de libertad definidos en este mismo. Para el movimiento de los motores, se incluyó el esquema de control de la Fig. 6. Con esto, es posible simular el movimiento del efector final. A continuación, se muestra el código en MatLab para realizar la simulación y también una imagen de la simulación de salida, teniendo como entrada un set de coordenadas (X, Y) y obteniendo como salida el movimiento del efector final en las coordenadas indicadas.

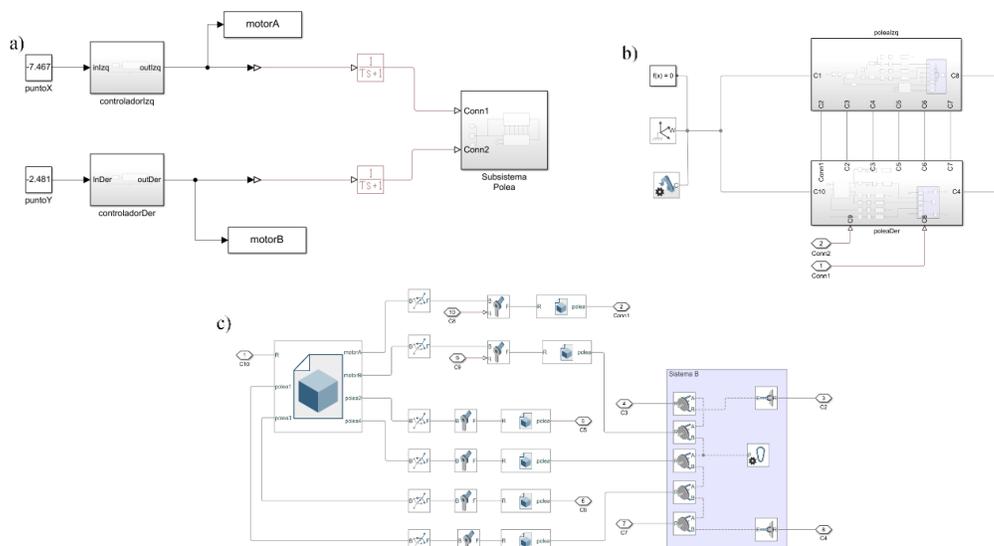


Fig. 6. Esquema de control en la simulación completa: a) Sistema general de controlador y planta, b) Esquema de interconexión de dos poleas, c) Sistema multicuerpo de una polea.

7

El funcionamiento del sistema es el siguiente. Se enciende el programa, inicia y se procede a calibrar, esto quiere decir que, por medio del sistema de visión, el efector final recibe una señal de moverse a cierta coordenada para así colocarse en el centro del espacio de trabajo. Una vez concluido este proceso, el usuario deberá colocar su mano sobre el efector final y el sistema de visión envía una señal. Cuando esto pase, los motores reciben una bandera indicando que el usuario está listo y comenzarán a moverse en diferentes direcciones para así mover el efector final. El usuario deberá seguir el efector con su mano durante un tiempo determinado (30 segundos), si el sistema de visión detecta que el usuario tiene un buen nivel de reacción (mayor a 85% de efectividad), los motores aumentarán su velocidad para así aumentar la dificultad del entrenamiento, en caso contrario, no se aumenta la velocidad. Tras 30 segundos, el movimiento de los motores se detiene y el puntaje del usuario se muestra en la LCD (véase Fig. 7).

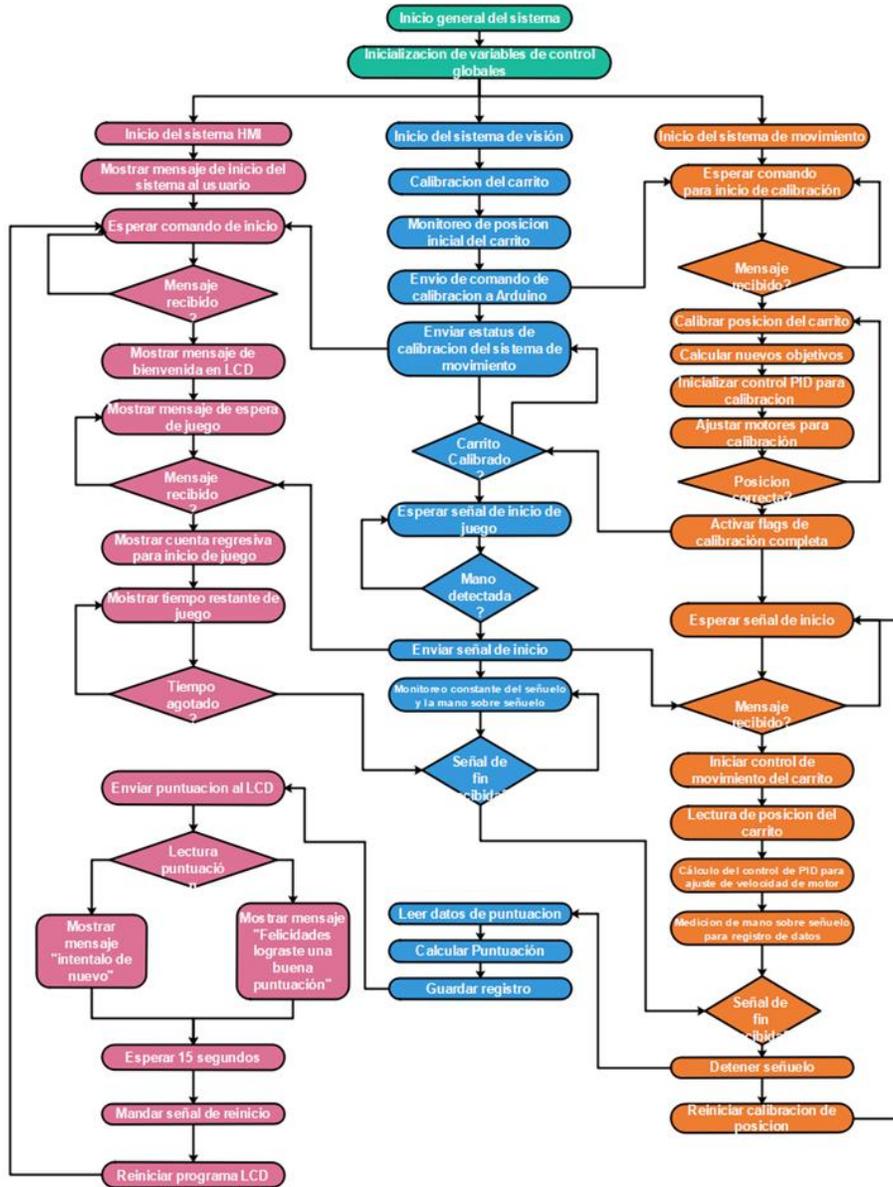


Fig. 7. Diagrama del software.

III. RESULTADOS

Una vez el robot se ensambló, se hicieron pruebas para obtener las constantes del sistema de control PID. Se utilizó el segundo método de Ziegler Nichols para obtener estos valores como lo describe V. Alfaro [19]. El segundo método de Ziegler Nichols, también llamado como método de oscilación, propone iniciar con las constantes K_i y K_d en 0, haciendo el sistema uno únicamente proporcional, a continuación, se eleva la constante K_p paulatinamente hasta obtener un valor (K_p crítico) que ponga el sistema en una oscilación con amplitud constante. Esto se logró con una $K_p = 50$.

∞

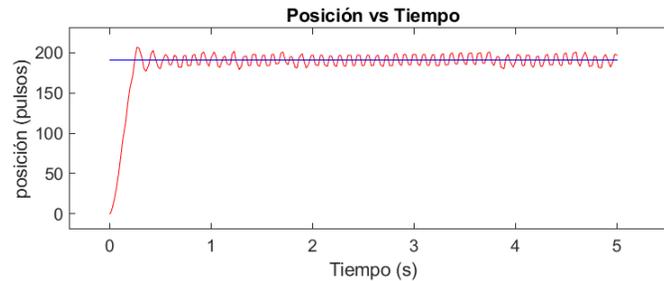


Fig. 8. Sistema con K_p crítico en motor A.

El método requiere que se mida el periodo de las oscilaciones y con esto se obtenga el periodo crítico, de modo que los coeficientes finales para el sistema se obtienen como:

- $K_p = 0.6 * K_{p_crítico}$
- $K_i = 0.5 * \text{Periodo crítico}$
- $K_d = 0.125 * \text{Periodo crítico}$

Para este sistema el *Periodo crítico* = 0.11s, por lo que las constantes para el sistema de control PID resultan en los siguientes valores:

- $K_p = 30$
- $K_i = 0.055$
- $K_d = 0.01375$

En cuanto a la detección del carrito a través de la cámara, se realizaron pruebas en un salón en condiciones ideales, asegurando la ausencia de sombras y cambios en la luz solar que pudieran alterar los resultados. En la gráfica se presenta el porcentaje del color del robot que detectaba la cámara. Lo ideal sería que siempre se detectara el 75%, 50% o 25% del robot. Esto no fue cierto, pues observamos variaciones de 1% o 2%. Estas variaciones son evidentes en la gráfica, demostrando que, a pesar de las condiciones controladas, hubo pequeñas fluctuaciones en la detección del color del robot por parte de la cámara. Estas variaciones se deben al diseño del carrito, ya que, al contar sólo con un riel, es un poco inestable. No siempre se encuentra en una posición plana, si no que a veces tiende inclinarse, lo cual genera que la cámara no detecte el 100% del mismo. En la Fig. 9 se muestran los resultados obtenidos de la comparativa de mediciones reales y esperadas.

9

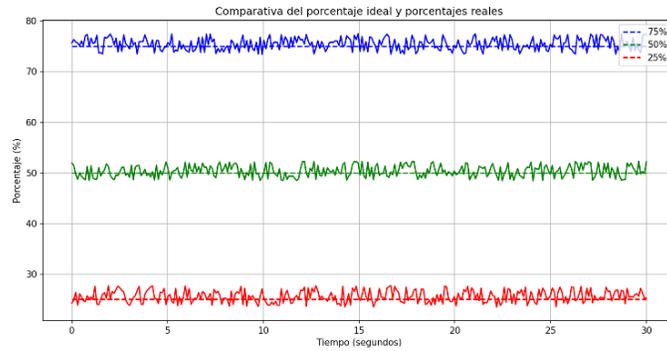


Fig. 9. Detección del carrito con base en pruebas realizadas.

En cuanto a los resultados de la calibración de los motores resultó que esta fue tan precisa durante la calibración de la cámara con respecto al centro del área del prototipo que la esperada dentro de las condiciones establecidas en un principio como claves de movimiento. En la siguiente gráfica, se presenta de color rojo el centro real y de color azul, lo que la cámara detectaba como “centro” en un lapso de 10 segundos. En verde, se observa nuestro límite de error establecido, el cuál servía para corroborar si es que la cámara se descalibraba en algún momento. En la gráfica, se observa cómo la cámara detectó el centro real correctamente. Sin embargo, también se puede notar cómo existieron algunas variaciones. Es importante recordar que con base en los cuadrillos verdes que se encontraban en las esquinas del prototipo, la cámara definía el centro del área, por lo que, si la cámara no detectaba el 100% del cuadrillo, la búsqueda del centro no era la adecuada. Adicional, la cercanía del usuario con respecto a la cámara generaba un poco de inestabilidad, lo que también influía en estas variaciones.

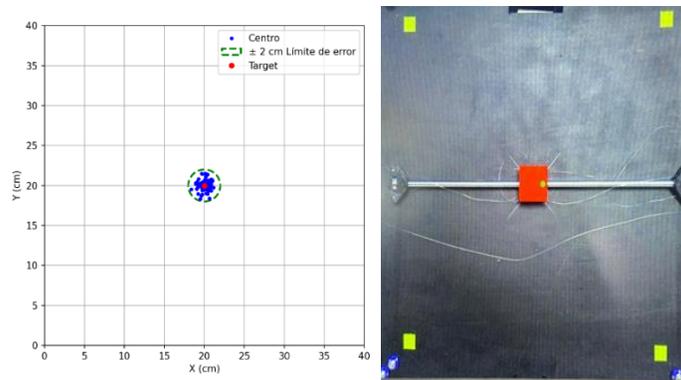


Fig. 10. Detección del centro con base en pruebas realizadas a) Mediciones realizadas del sistema, b) mediciones realizadas a partir de la cámara del sistema.

A continuación, siguieron las pruebas para el sistema del robot cartesiano. Se realizaron medidas físicas con base en la señal de los encoders. Para ello se seleccionó una posición de (-50, -20) para que ambos motores giraran con puntos de establecimiento distintos y así poder observar la respuesta de ambos. Para probar la exactitud de las simulaciones se llevaron a cabo pruebas comparativas con el sistema completo, se debe tomar en cuenta que el modelo realizado en Simscape es un modelo cinemático, que toma en cuenta los grados de libertad de todas las poleas, pero no toma en cuenta las fuerzas aplicadas al sistema, por lo que no es un sistema dinámico. Al observar los resultados en la Fig.11, la simulación no presenta oscilaciones y llega al punto de manera críticamente amortiguada. Sin embargo, el motor A físico sí presenta oscilaciones en la respuesta, aun así, ambos convergen en el setpoint con un tiempo de establecimiento de casi medio segundo. El caso del motor

B es similar, contando con el mismo sobre impulso que el motor A, pero podemos ver un defecto intrínseco de los motores con control por PWM, la señal de error que el controlador otorga para el motor B no es capaz de accionar el motor y por ello no llega al objetivo establecido (véase Fig. 11).

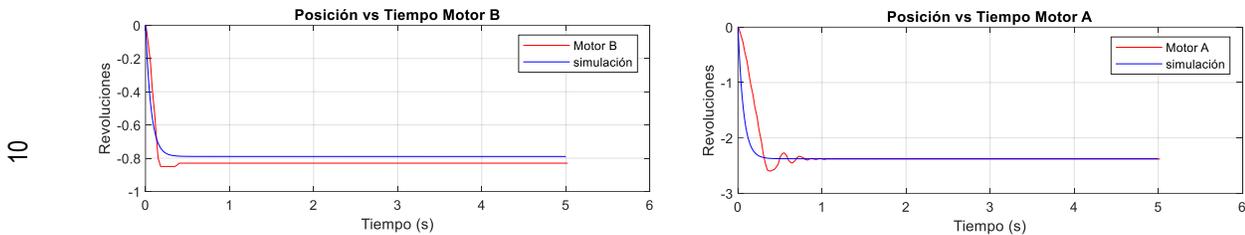


Fig. 11. Comparación de comportamiento del motor real y en simulación.

IV. CONCLUSIONES

La implementación de robots cartesianos en el ámbito deportivo tiene el potencial de revolucionar la mejora de reflejos en deportistas de alto rendimiento, ofreciendo precisión y consistencia en la medición de los resultados obtenidos. Aunque en estos momentos, el desarrollo de este tipo de dispositivos de entrenamiento se ha visto limitado por el tipo de tecnología que estas utilizan, estas pueden ser mejoradas mediante la integración de sistemas biomecánicos que permitan medir variables biomecánicas estandarizadas. Es por ello que resulta de suma importancia desarrollar nuevos sistemas de entrenamiento para los deportistas, mediante los cuales se pueda evaluar la biomecánica de movimiento a partir condiciones bien definidas del funcionamiento del dispositivo. Para demostrar esta situación, se desarrolló el sistema biomecánico para el entrenamiento de reflejos deportivos utilizando los principios de modelado de robots cartesianos tipo Core XY Por ello en el presente trabajo se desarrolló la función de transferencia que rige el comportamiento del modelo a partir de la cual se pueden controlar de manera precisa los motores del sistema. Esto permite obtener un sistema que, derivado de las pruebas preliminares realizadas, permite ser efectivo en la detección del objetivo de entrenamiento. El trabajo en este momento cumple con las expectativas de diseño planteadas en los requerimientos expuestos del diagrama QFD, restando que en trabajos futuros se desarrollen pruebas de campo donde se puedan evaluar las capacidades de atletas reales utilizando el sistema. Además, se recomienda que para mejorar el rendimiento del sistema, así como de la seguridad de uso del sistema, se incluya un sistema de iluminación así como el diseño de un controlador específico que sirva de base para la sustitución del Arduino de bajo poder de procesamiento de datos, proponiéndose tal vez el uso de un sistema basado en la placa ESP32. También se recomienda que el uso de materiales sea más rígido y la adecuada instalación de una cubierta de acrílico e implementación de un sistema de doble riel para el efector final, con lo cual se puedan realizar pruebas extendidas de funcionamiento.

REFERENCIAS

- [1] J. R. Rizzo, M. Beheshti, T. Naeimi, F. Feiz, G. Fatterpekar, L. J. Balcer, S. L. Galetta, A. G. Shaikh, J. C. Rucker, T. E. Hudson, "The complexity of eye-hand coordination: a perspective on cortico-cerebellar cooperation," *Cerebellum & Ataxias*, pp. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40673-020-00123-z>
- [2] P. T. Chan, W. C. Chang, H. L. Chiu, C. C. Kao, D. Liu, H. Chu, K. R. Chou, "Effect of interactive cognitive-motor training on eye-hand coordination and cognitive function in older adults," *BMC Geriatrics*, vol. 19, nº 27, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12877-019-1029-y>
- [3] A. Buscemi, et al., "Role of Sport Vision in Performance: Systematic Review," *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, vol. 9, nº 2, pp. 1-18, 2024. <https://doi.org/10.3390/jfmk9020092>

- [4] G. Paterson, *Visual-Motor Response Times in Athletes and Non-Athletes*, Stellenbosch, Sudáfrica: Departamento de Ciencias del Deporte, Universidad de Stellenbosch, 2010.
- [5] P. Maman Biswas, S. Kumar, S. Jaspal Singh, "Role of sports vision and eye hand coordination training in performance of table tennis players," *Brazilian Journal of Biomechanics*, vol. 5, n° 2, pp. 106-116, 2011. <https://www.redalyc.org/pdf/930/93018957006.pdf>
- [6] J. F. Clark, B. E. Betz, L. T.G. Borders, A. Kuehn-Himmler, K. A. Hasselfeld, J. G. Divine, "Vision Training and Reaction Training for Improving Performance and Reducing Injury Risk in Athletes," *Journal of Sports Performance Vision*, vol. 1, n° 1, pp. 8-16, 2020. <https://doi.org/10.22374/jspv.v2i1.4>
- [7] F. Moya-vergara, D. Curotto-Berruezo, P. Valladares-Arellano, E. Arriaza-Ardiles, T. Valverde-Esteve, J. García-Manso, "Evaluation of visual-motor reaction time and quality of response in rugby sevens players after the application of a neurocognitive training programme," *International Journal of Performance Analysis in Sport*, vol. 19, no. 6, 2019, <https://doi.org/10.1080/24748668.2019.1691814>
- [8] W. Tai, R. Zhang, L. Zhao, "Cutting-Edge Research in Sports Biomechanics: From Basic Science to Applied Technology," *Bioengineering*, vol. 10, n° 668, 2023. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060668>
- [9] Ferraz, P. Duarte-Mendes, H. Sarmento, J. Valente-Dos-Santos, B. Travassos, "Tracking devices and physical performance analysis in team sports: a comprehensive framework for research-trends and future directions," *Frontiers in Sports and Active Living*, pp. 1-19, 2023. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1284086>
- [10] J. Harpham, J. Mihalik, A. Littleton, B. Frank, K. Guskiewicz, "The Effect of Visual and Sensory Performance on Head Impact Biomechanics in College Football Players," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 42, n° 1, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0881-8>
- [11] G. Theofilou, I. Ladakis, C. Mavroidi, V. Kilintzis, T. Mirachtsis, I. Chouvarda, E. Kouidi, "The Effects of a Visual Stimuli Training Program on Reaction Time, Cognitive Function, and Fitness in Young Soccer Players," *Sensors*, vol. 22, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22176680>
- [12] K. Burris, S. Liu, L. Appelbaum, "Visual-motor expertise in athletes: Insights from semiparametric modelling of 2317 athletes tested on the Nike SPARQ Sensory Station," *Journal of Sports Sciences*, vol. 37, n° 1, pp. 15-27, 2019. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1698090>
- [13] S. M. Kung, T. K. Suksreephaisan, B. G. Perry, B. R. Palmer, R. A. Page, "The Effects of Anticipation and Visual and Sensory Performance on Concussion Risk in Sport: A Review," *Sports Medicine*, vol. 6, n° 54, pp. 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40798-020-00283-6>
- [14] K. Hassan, M. M. Alhumaid, B. E.Hamad, "The Effect of Using Reactive Agility Exercises with the FITLIGHT Training System on the Speed of Visual Reaction Time and Dribbling Skill of Basketball Players," *Sports*, vol. 10, n° 176, 2022. <https://doi.org/10.3390/sports10110176>
- [15] A. Pérez-Castilla, F. García-Pinillos, "Sports Biomechanics Applied to Performance Optimization," *Applied Sciences*, vol. 14, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14093590>
- [16] R. De Fazio, V. Mastronardi, M. De Vittorio, P. Visconti, "Wearable Sensors and Smart Devices to Monitor Rehabilitation Parameters and Sports Performance: An Overview," *Sensors*, vol. 23, n° 4, pp. 18-, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23041856>
- [17] M. F. Zupan, A. W. Arata, A. Wile, R. Parker, "Visual adaptations to sports vision enhancement training: A study of collegiate athletes at the US Air Force Academy," *Optometry - Journal of the American Optometric Association*, vol. 43, pp. 43-48, 2006. <https://sponet.fi/Record/4039071>
- [18] L. G. Appelbaum, G. Erickson, "Sports vision training: A review of the state-of-the-art in digital training techniques," *International Review of Sport and Exercise Psychology*, vol. 9, n° 1, pp. 160-189, 2016. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2016.1266376>
- [19] M. Alfaro, "Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores," *Ingeniería*, vol. 12, no. 1-2, 2002. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/6430>