

Sistema de retroalimentación postural en tiempo real mediante visión por computadora para ejercicio de sentadilla con barra

Lemus Salgado, Venecia

2024

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/6015>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

Sistema de retroalimentación postural en tiempo real mediante visión por computadora para ejercicio de sentadilla con barra

Lemus Salgado Venecia (noveno semestre en Ingeniería Biomédica)^{1,*}, Sánchez Robledo Berenice (noveno semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Zamarrón Ramírez Joshua Alejandro (octavo semestre en Ingeniería en Sistemas Computacionales)¹, Morúa Álvarez Nora del Rocío (profesor responsable)¹, Moreno Hernández Ana (profesor asesor)¹ y Pérez Aguirre Rafael (profesor asesor)¹.

¹Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

Resumen

La Organización Mundial de la Salud clasifica las actividades de fortalecimiento muscular en cuarto lugar en sus recomendaciones, se destaca la relevancia de una ejecución adecuada para evitar lesiones en áreas críticas del cuerpo como muñecas, hombros, espalda y rodillas [1]. Se seleccionó el ejercicio de sentadilla debido a su reconocimiento mundial y su efectividad en el fortalecimiento del tren inferior. La importancia de corregir la técnica en sentadilla con barra radica en la prevención de lesiones. Este proyecto, se centró en el desarrollo de un sistema de retroalimentación postural en tiempo real para la realización de sentadillas con barra, utilizando visión por computadora. Se emplearon bibliotecas como Mediapipe para la detección y seguimiento del cuerpo, lo cual permitió programar en Python, un sistema que alerta visualmente al usuario ante errores técnicos durante la ejecución del ejercicio. Esta innovación se diseñó para ofrecerse como una herramienta adicional para los entrenadores en instituciones deportivas como gimnasios. Para mejorar la precisión, se incorporaron dos cámaras que capturan simultáneamente la vista frontal y lateral de la persona en tiempo real. Esta configuración permitió identificar los errores más frecuentes en la ejecución de la sentadilla con barra, logrando una interfaz manipulable capaz de detectar seis de los errores más comunes asociados al ejercicio. Estos errores, detectables mediante el uso de cámaras, son responsables de la mayoría de las lesiones relacionadas con la sentadilla. Esta herramienta podría ser utilizada como apoyo por profesionales de la salud para agilizar sus procedimientos.

Palabras clave: Detección postural, visión por computadora, sentadilla, PyQt, Mediapipe.

***Autor Corresponsal:** venecia.lemus@iberopuebla.mx

Introducción

La fuerza física se rige como uno de los pilares fundamentales del desarrollo humano, destacándose entre las demás cualidades físicas como la resistencia, la flexibilidad y la velocidad. Su importancia radica en su capacidad para potenciar y mejorar otras habilidades físicas, como la velocidad y la resistencia en diversas actividades deportivas y cotidianas. Además de su influencia en el rendimiento físico, el entrenamiento de fuerza conlleva una amplia gama de beneficios para la salud y el bienestar general, incluyendo el mantenimiento de una postura adecuada, la prevención de lesiones al fortalecer músculos y articulaciones, y la mejora de la salud metabólica y cardiovascular [2].

En la sociedad contemporánea, nos enfrentamos a un incremento constante en los índices de sobrepeso y obesidad a nivel global. Este fenómeno es especialmente relevante en países como México, donde más del 75% de la población adulta se ve afectada por problemas de sobrepeso u obesidad, alcanzando cifras superiores al 80% en algunas regiones [3]. Las causas de esta situación son multifacéticas, abarcando desde factores genéticos hasta hábitos de alimentación, sedentarismo y condiciones socioeconómicas. Este aumento en la prevalencia de sobrepeso y obesidad no solo conlleva riesgos para la salud física, como la diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares, sino que también puede tener impactos significativos en la salud mental y emocional de las personas. Además, estos problemas pueden desencadenar complicaciones adicionales, como problemas

musculoesqueléticos, autoestima reducida y depresión, contribuyendo así a perpetuar el ciclo de la obesidad [3].

Un aspecto crucial para considerar es la relación entre el ejercicio físico y la tendencia a sufrir lesiones. Datos muestran que aproximadamente el 4.5% de las mujeres y el 0.6% de los hombres sufren lesiones anualmente debido a una incorrecta ejecución de ejercicios, especialmente en entrenamientos con pesas [4].

La sentadilla es un ejercicio de vital importancia en cualquier régimen de entrenamiento, ya que ofrece una serie de beneficios significativos para el progreso físico y la prevención de lesiones musculares. Se considera uno de los ejercicios más completos para fortalecer las extremidades inferiores, promoviendo la resistencia y reduciendo el riesgo de lesiones. Los cuádriceps, por ejemplo, son los músculos principales implicados en la sentadilla, siendo responsables de la extensión de las rodillas durante el movimiento ascendente. Estos músculos sirven para generar fuerza y estabilidad en las piernas durante el ejercicio. [5]

Sin embargo, su ejecución técnica es decisiva, ya que una forma inadecuada puede llevar a lesiones y disminuir la eficacia del entrenamiento.

En este contexto, surge la oportunidad de integrar la tecnología basada en inteligencia artificial (IA) en el ámbito del entrenamiento deportivo para mejorar la técnica de ejercicio y prevenir lesiones. Mediante sistemas de visión por computadora y algoritmos de aprendizaje automático, es posible proporcionar retroalimentación postural en tiempo real, un recurso invaluable para atletas y entusiastas del

fitness por igual. Este proyecto se enfocó específicamente en el desarrollo de un sistema que no solo monitorea la ejecución de la sentadilla, sino que también proporciona indicaciones instantáneas para la corrección de la postura, representando así un avance significativo en el campo del entrenamiento deportivo y la prevención de lesiones.

Desde el punto de vista biomecánico, la técnica adecuada de la sentadilla libre implica una serie de consideraciones importantes. Comienza con la posición de los pies, que deben estar separados al ancho de los hombros o ligeramente más, con las puntas ligeramente hacia afuera. Al descender, es crucial mantener la espalda recta y el pecho elevado, asegurando que las caderas se muevan hacia atrás y hacia abajo, manteniendo las rodillas en línea con los pies. La profundidad ideal es aquella en la que los muslos están paralelos al suelo o ligeramente más abajo, siempre que la postura se mantenga neutra y sin comprometer la curvatura natural de la columna vertebral [6,7].

Los grupos musculares fundamentales, involucrados en la sentadilla libre son los cuádriceps, isquiotibiales, glúteos y músculos del core. Los cuádriceps son responsables de la extensión de la rodilla, mientras que los isquiotibiales y glúteos facilitan la extensión de la cadera. Los músculos del core, incluyendo los erectores espinales, juegan un papel crucial en la estabilización de la columna vertebral durante el movimiento. [8,9]

A pesar de los beneficios de la sentadilla libre, existen riesgos asociados con una técnica incorrecta. Algunos de los errores más comunes incluyen mantener los talones levantados al flexionar, apuntar las puntas de los pies hacia adentro, adelantar las rodillas más allá de los pies, mantener las rodillas muy hacia afuera o hacia adentro, y mantener la espalda curvada [10]. Para el actual proyecto se consideró información enfocada a la población general y al llevar un entrenamiento se debe personalizar dados los objetivos y condiciones específicas del usuario; por lo tanto, es necesario ir con un profesional especialista en Preparación Física y Deportiva, ya que son los expertos en ajustar un entrenamiento a las necesidades personales.

Entre los riesgos asociados a la sentadilla libre se encuentran la tendinitis rotuliana, problemas de meniscos, lesiones de espalda y contracturas musculares [11]. Para prevenir estas lesiones, es crucial mantener siempre una técnica adecuada, que puede incluir bajar más allá de los 90 ° de flexión de rodilla durante la sentadilla siempre y cuando no se comprometan músculos a sobre esfuerzo que puedan aumentar el riesgo de una lesión, mantener la espalda recta y evitar que las rodillas sobrepasen la línea vertical de la punta del pie. [12]

La visión por computadora es un campo de estudio interdisciplinario que se centra en el desarrollo de algoritmos y técnicas para permitir a las computadoras interpretar y comprender el contenido visual del mundo real. Se basa en la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes y videos digitales para extraer información útil y tomar decisiones automáticas o asistidas por computadora [13]. Su objetivo principal es permitir a las máquinas entender y actuar en entornos visuales de manera similar a como lo hacen los seres humanos.

En proyectos relacionados, se ha explorado el uso de diferentes librerías y técnicas para corregir posturas en ejercicios específicos, mostrando avances significativos en la detección y corrección de errores posturales [14]. Sin embargo, es necesario continuar mejorando estos sistemas para abordar una variedad más amplia de ejercicios y errores comunes.

Dentro de este marco, se plantea el desarrollo de este proyecto, con el fin de crear un sistema con inteligencia artificial de detección postural que integre los puntos anatómicos obtenidos del cuerpo humano y el procesamiento de corrección postural en tiempo real para la sentadilla libre, utilizando diversas tecnologías y herramientas emergentes del área de sistemas computacionales [15,16,17,18,19,20]. Estas herramientas proporcionarán la base técnica necesaria para analizar los datos de entrada de video, identificar patrones de movimiento, ofrecer retroalimentación instantánea para mejorar la técnica de entrenamiento y proporcionar un resumen final al usuario resaltando sus errores para que pueda corregirlos.

Teniendo en cuenta este contexto, la intención principal de este proyecto es desarrollar una solución tecnológica que combine la biomecánica, herramientas de tecnologías emergentes y la visión por computadora para mejorar la ejecución de la sentadilla libre con barra, complementando la labor de un especialista en preparación física. En resumen, el objetivo general fue desarrollar un sistema de retroalimentación postural en tiempo real para sentadilla con barra, mediante tecnologías emergentes.

Metodología

En la primera etapa del desarrollo del proyecto, se inició con la identificación de las variables clave a analizar por el sistema, las cuales se obtuvieron a través de un detallado estudio de los movimientos biomecánicos asociados a la ejecución de la sentadilla. Como la sentadilla libre con barra es un ejercicio muy complejo que involucra la activación de grupos musculares y articulaciones, fue imperativo determinar las mediciones goniométricas principales para hacer un análisis biomecánico exhaustivo y preciso del movimiento.

Con base en este análisis, se determinaron las funcionalidades y especificaciones imprescindibles para diseñar el código de programación y la interfaz. Este diseño se enfocó en el desarrollo de un sistema computacional que se ajusta de manera precisa a las necesidades de retroalimentación en tiempo real del usuario. Dichas necesidades se identificaron con base en los errores que se describen en la biomecánica del ejercicio, los cuales pueden provocar lesiones en el usuario y una ejecución incorrecta del mismo. Para la selección de errores, se consultaron repositorios biomecánicos deportivos para obtener los más comunes y detectables a través del uso de estas tecnologías, estos errores incluyen: cuello y columna excesivamente encorvados, elevación de talón al flexionar, extrema inclinación de la barra y que las rodillas flexionen en valgo, es decir, que se dirijan hacia el centro del cuerpo, cuando lo ideal es que tengan cierta desviación hacia los costados en

dirección a las puntas del pie. Estos errores se especificarán con mayor detalle en la sección de Resultados.

Se realizó un diseño de interfaz correspondiente a los requerimientos del proyecto y necesidades del usuario, utilizando las herramientas de PyQt y PyQt Designer, además de las librerías de OpenCv2, MediaPipe, Pandas, NumPy y Matplotlib; estas últimas se utilizaron para el desarrollo del código de programación en Python. La primera librería que se seleccionó fue Mediapipe debido al amplio marco de trabajo que esta puede generar con el seguimiento de las articulaciones de cuerpo de un usuario, además que, dadas las condiciones adecuadas como iluminación, calidad de imagen y procesamiento computacional, Mediapipe puede lograr una precisión de aproximadamente el 90% del traqueo corporal [16], lo cual en este proyecto fue relevante para el análisis biomecánico de los ejercicios.

En el desarrollo del código, se implementó el traqueo corporal mediante landmarks para el seguimiento preciso de las articulaciones corporales y la visualización en tiempo real de dicho traqueo a través de dos cámaras estratégicamente posicionadas. Estas cámaras se usaron como entrada de nuestro sistema y usamos el modelo Logitech C270 Webcam HD, 720p/30fps, para el procesamiento digital de imagen en tiempo real, lo que permitió obtener resultados y requerimientos mínimos del sistema de retroalimentación postural detallados en este artículo.

Fue necesario, realizar un diagrama de montaje de captura de imagen que se muestra en la Fig.1. Este proceso resultó relevante para determinar la posición final de las cámaras y la computadora. Esta disposición garantizó que, en instancias posteriores, el usuario pueda visualizar íntegramente su imagen en la pantalla, lo que le permitirá verificar con precisión su retroalimentación correspondiente de manera efectiva y sin contratiempos.

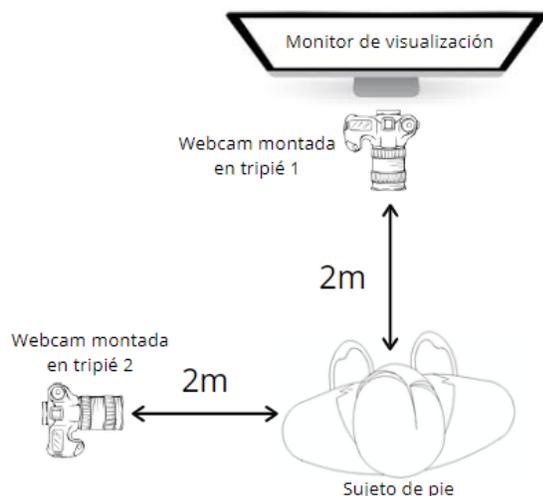


Fig. 1. Diagrama de montaje de captura de imagen.

Se utilizaron dos cámaras, una colocada para obtener el plano coronal (vista frontal) y el plano sagital (vista lateral), con el fin de capturar imágenes detalladas desde múltiples perspectivas. Este enfoque permitió una correcta visualización del usuario durante la ejecución de la

sentadilla, facilitando así un análisis preciso de su técnica y postura.

Después, se identificaron las articulaciones implicadas en el ejercicio de la sentadilla, usando técnicas de biomecánica y análisis de movimiento. Se determinó que, para mantener una posición adecuada, el usuario debe coordinar activamente las articulaciones del tronco inferior del cuerpo, incluyendo la cadera, la rodilla, el pie y el talón. Este análisis anatómico proporcionó una comprensión más profunda de los requerimientos biomecánicos involucrados en el ejercicio, lo que a su vez permitió optimizar la técnica y minimizar el riesgo de lesiones.

Para determinar la posición correcta de la barra, se consideró un punto de cada mano, que coincide con la posición de la barra al sujetarla. Luego, se calculó y recuperó, el ángulo formado entre ellos para definir el ideal que corresponde a los 0° grados (totalmente horizontal). Para la corrección visual, se tomaron como referencia 10° grados, que son seguros para cualquier usuario, manejamos este dato, ya que el específico depende de cada anatomía individual. Esto aplica para todos nuestros errores.

Se definieron los rangos goniométricos seguros, basados en [8] para la detección de técnica del ejercicio fuera de los rangos establecidos. Los reconocimientos de técnica detectados por nuestro sistema fueron: orientación de las piernas, inclinación del cuello y columna, estabilidad del talón, flexión dentro de rangos y posición de barra; de tal forma que, a través de alertas visuales, el usuario reciba retroalimentación de su serie, de acuerdo con sus rangos de movimiento para corregirlo en tiempo real.

Se incorporó un contador de repeticiones, que considera una repetición al cumplir con el rango de desplazamiento de flexión de rodilla, que debe ser igual o mayor a los 90° [8]. Entonces, se procedió al proceso de desarrollo de interacción con el usuario para la debida retroalimentación.

Una vez obtenido lo anterior, se procedió a desarrollar las gráficas de movimiento correspondientes a los puntos de las articulaciones de todo el cuerpo al realizar el ejercicio durante todos sus rangos de movimiento, en total Mediapipe brinda 32 puntos.

Posteriormente, se vinculó lo anterior con la librería Matplotlib, una herramienta indispensable para generar una amplia gama de gráficos de alta calidad que facilitan la presentación de resultados numéricos [19]. Gracias al uso de esas herramientas, se extrajeron las coordenadas de los ejes x , y y z , corporales lo cual proporciona a profesionales de la salud una herramienta cuantitativa y gráfica. Esto permite el análisis detallado gracias a su formación profesional del desplazamiento de cada punto, lo que resulta en la evaluación y seguimiento más adecuado de pacientes.

Después de completar esta etapa, se procedió con el diseño de la interfaz, mediante el uso de PyQt y PyQt Designer. Se realizó un diseño basado en interfaces ya existentes en el mercado, relacionadas con el requerimiento actual y aplicaciones deportivas en las que se muestra el seguimiento corporal del usuario, adaptado al valor agregado que representa el desarrollo de este proyecto. En la interfaz, se diseñaron diferentes pantallas y ventanas emergentes que

cumplen con lo requerido para el inicio del análisis de movimiento de la sentadilla (fig.2).



Fig. 2. Desarrollo del diseño de interfaz.

Para incorporar funcionalidades en mejora de la interfaz, se adicionaron dos botones mostrados en la pantalla principal, en la cual el usuario se encuentra de frente (corte coronal), que son: “Reiniciar contador de repeticiones” y “Volver al menú principal”. Reiniciar contador se encarga de restablecer el conteo de repeticiones para volver a registrar una serie del usuario. Por su parte, Volver al menú, se encarga de transportar al usuario al menú inicial donde puede elegir inicializar el sistema o solicitar información; con lo cual se despliega una ventana emergente con un Manual de Usuario, que explica cómo utilizar el sistema y consideraciones importantes para su correcta ejecución. Algo importante a señalar es el uso y selección de los botones mencionados, el usuario los puede señalar, utilizando sus manos como cursor al verse detectados en tiempo real por las cámaras, de esta forma, es mucho más intuitivo el uso y muy visual. Para terminar, se realizaron pruebas y se definieron requerimientos mínimos para aproximarse a la precisión del 90% en detección postural.

Resultados y Discusión

En relación con la identificación de goniometría y biomecánica del ejercicio. Es importante mencionar que se debe contar con un buen rango de dorsiflexión de tobillo para permitir que las rodillas avancen correctamente y así, priorizar la flexión máxima de la rodilla ya que es recomendable, aunque dependiente de los objetivos personales, una flexión igual o mayor a 90° para evitar lesiones y fortalecer las extremidades inferiores. [9]

En cuanto a la posición de los pies, se debe mantener al ancho de hombros, con los dedos apuntando hacia adelante y ligeramente hacia afuera en un ángulo máximo de 30°, distribuyendo la presión en toda la planta, es por eso por lo que es sustancial la constante detección de los talones que deben estar en contacto con el piso en todo momento, para una mayor estabilidad. En cuanto al agarre de la barra, es necesario mantenerla en equilibrio, sobre todo cuando se levantan grandes pesos. Para la posición de la cabeza y el torso, se debe mantener la vista al frente, con la cabeza alineada con la columna. Las rodillas, deben seguir el ángulo de los pies (de no más de 30°), y evitar el valgo en rodillas, esta posición podría dañar la zona del ligamento colateral interno.[10]

Para procesar digitalmente la imagen en el ejercicio de sentadilla, se realizó primero el traqueo corporal, en el que se obtuvieron los puntos de las articulaciones del cuerpo de la Fig.3 en color blanco y azul.



Fig. 3. Traqueo corporal

En el desarrollo del sistema, se implementó el uso del cálculo de la pendiente de la barra, a través de la distancia entre los puntos de las manos y definiendo un rango de umbral para considerar esta línea como equilibrada.

Se calcularon los ángulos de la posición de las piernas a partir del producto de los vectores que involucran los puntos de la cadera y la rodilla en el traqueo obtenido utilizando la Ec1.

$$\cos(\theta) = \frac{\text{vector1} * \text{vector2}}{\text{magnitud}_{\text{vector1}} * \text{magnitud}_{\text{vector2}}} \quad (1)$$

En relación con las gráficas de movimiento de la sentadilla, se obtuvieron en tiempo real para poder analizar esto en el resumen del ejercicio y poder presentarlo al usuario. Las gráficas muestran los puntos que se usaron para el traqueo corporal correspondiente, como se muestra en la Fig.4.

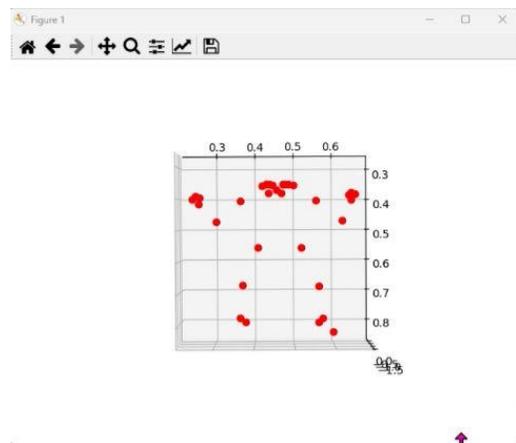


Fig. 4. Gráfica en 3D del movimiento de sentadilla.

En la Fig.5 se observa la forma en la que se mide los ángulos de flexión y extensión de la rodilla, además de la nivelación de la barra junto con el contador de repeticiones. Sin embargo, se redefinió obtener las tomas de flexión en corte sagital, ya que, desde este plano, la toma de ángulos es mucho más efectiva, se puede comparar con la Fig. 6. Además, sólo se toma como referencia el lado izquierdo, ya

que al traquear ambos, se encimaban y había variabilidad y ruido.



Fig.5. Pantalla de medición de movimiento de sentadilla



Fig. 6. Captura de datos goniométricos en plano sagital, sólo lado izquierdo.

Ya definida la captura de datos y recabada la información biomecánica del ejercicio mediante goniometría, se desarrolló el diseño de la interfaz; en la Fig.7 se muestran las pantallas devueltas al ingresar a *Pump-it*, nombre que se asignó a nuestro sistema. Esta, se diseñó en conjunto con la investigación de diversas aplicaciones deportivas y en relación con los colores institucionales, esto para ofrecer una personalización e identidad a nuestro trabajo.



Fig.7. Pantallas desplegadas por nuestra interfaz.

Además del seguimiento corporal, el sistema también incluyó una pantalla dedicada a la visualización en tiempo real del sujeto. Esta pantalla no solo muestra en vivo al usuario sino también los puntos de referencia y las conexiones entre ellos, proporcionando una retroalimentación visual instantánea sobre la postura y el movimiento.

Así es como, el sistema captura imágenes de video a través de las cámaras web, y a partir de la implementación de visión por computadora, los resultados del seguimiento de poses se muestran en la GUI de PyQt, herramienta elemental para la integración del sistema a interfaz. Todo esto ocurre en un bucle continuo a través del procesamiento digital de imagen en tiempo real, lo que permite una experiencia fluida para el usuario.

Las pruebas se centraron en garantizar la correcta visualización de los ángulos de movimiento, así como la aparición adecuada de los mensajes de contador y nivelación de la barra en las partes superior e inferior de cada pantalla de la interfaz. Además, se incluyeron indicadores de texto para las articulaciones, como se ilustra en la Fig. 8.

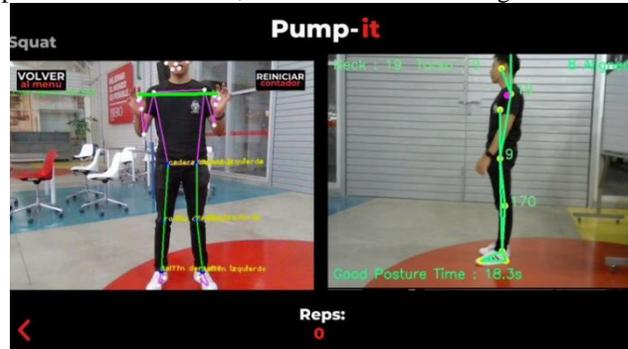


Fig. 8. Sujeto visualizándose en la interfaz.

Posteriormente, en la rectificación de funcionamiento de interfaz, se verificó que las pantallas se desplegarán correctamente. Además de que en las ventanas se mostrarán los datos numéricos y visuales correspondientes al requerimiento ya estipulado. Lo cual, debido al procesador computacional de cada computadora puede variar en tiempo. Para lograr la efectividad aproximada al 90% para el seguimiento de *landmarks* o puntos corporales, se debe cumplir con los requerimientos de software, hardware, de iluminación y ambiente descritos a continuación. En relación con el Hardware, se debe utilizar un procesador con al menos 4 núcleos físicos y 8 hilos de ejecución para un correcto rendimiento. Si es posible, utilizar una GPU dedicada compatible con CUDA para acelerar el procesamiento. Contar con una estación de trabajo de al menos 8 GB de RAM para manejar los datos y el procesamiento en tiempo real.

En el caso del Software, este sistema es compatible con Windows, macOS y Linux. Es necesario, tener instalado Python 3 junto con las bibliotecas necesarias estipuladas y descritas en el desarrollo del presente escrito.

Para los requerimientos ambientales, hay que asegurarse una iluminación adecuada en el entorno donde se utiliza el sistema, donde se encuentra el usuario y donde se detecta para su posterior análisis. En adición, controlar el ruido visual que acompaña al usuario y entra en cuadro en la captura de imagen es lo más recomendable, ya que así se evita que las herramientas utilizadas, confundan objetos no deseables para la aplicación y entorpezcan el desarrollo y funcionamiento retroalimentativo.

Al realizar las pruebas finales integrando todo lo mencionado, se notaron ciertas variaciones en la lectura de

parámetros importantes para el conteo de repeticiones que ocasionaban errores de conteo, además de la segmentación de acciones codificadas y el uso de entornos virtuales debido a lentitud o colapso del sistema en ciertas ocasiones. Esto requirió de ajustes computacionales para mejora considerable en la precisión, velocidad de procesamiento (obtenida cualitativamente en todas las pruebas por falta de cronometraje) y configuraciones adicionales en obtención de landmarks que se están rastreando y analizando. [21]

En cuanto se corrigieron los detalles mencionados, se realizaron 100 pruebas del sistema a un integrante del equipo, de las cuales se logró un 95% de certeza en el conteo de repeticiones, recordando que se cuentan al considerarse correctas entrando a los rangos de flexión igual o mayor a 90°, por lo que las repeticiones realizadas fuera de estos rangos se despreciaron de los resultados.

Al cumplir con los mínimos requerimientos y junto con una correcta implementación y configuración de las librerías, es posible alcanzar una precisión de aproximadamente el 90%, ya estipulado en los repositorios de Python. Mencionado eso, al superar estos requerimientos, también puede aumentar el porcentaje de detección postural, del cual se dependen los datos goniométricos.

En la Fig. 9 se desarrolló un diagrama con el listado de pasos en el que se presentan en orden, las instrucciones para utilizar el sistema, este diagrama describe lo ya mencionado en el Manual de usuario, que emerge del botón de información en el inicio del sistema.

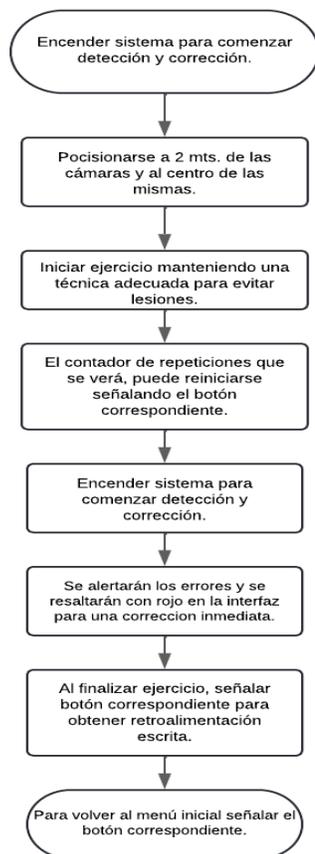


Fig. 9. Listado de pasos para el Manual de Usuario en forma de diagrama.

Algo a resaltar del diagrama anterior es el uso de los botones, además de la forma correcta de utilizarlos ya que están los que necesitan ser seleccionados con clic mediante la estación de trabajo y los que dependen de la interacción directa con el usuario permitiendo el uso de sus manos como cursores.

En resumen, es necesario encender el sistema y posicionarse a 2 mts. aproximados de las cámaras para poder ver el cuerpo del usuario (de pies a cabeza, considerando la flexión y extensión al realizar el ejercicio), después se debe iniciar con la serie del ejercicio para poder visualizar el procesamiento digital de imagen y evaluar la técnica del usuario y los posibles errores para corregir las fallas posturales específicas detectadas por este sistema y luego, obtener un resumen del ejercicio, que incluye: fecha y hora de repetición, total de errores, tiempo en comparación con el porcentaje correspondiente.

En relación con el trabajo a futuro, se plantea poder personalizar el sistema, registrando a cada usuario y guardando su proceso, esto se proyecta lograr mediante el desarrollo de una aplicación móvil ya realizada en su fase “demo” donde, además de mostrar el resumen ya descrito, se podrán guardar todos los registros de series realizadas cronológicamente como se aprecia en la Fig. 10.

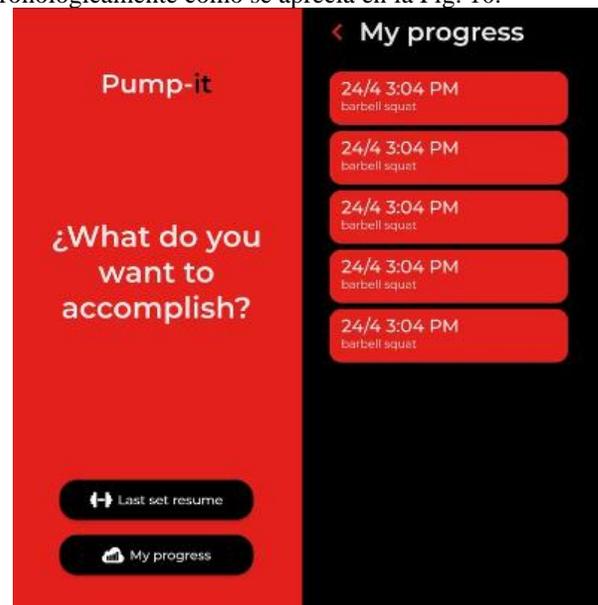


Fig.10. Diseño de pantalla con dos botones: uno para ver el último set y otro para ver el progreso total, esto para una aplicación móvil.

Además de las 100 pruebas ya consideradas, se cumplieron los requerimientos mínimos técnicos establecidos, por lo que se estima que el sistema ofrece el mínimo estipulado por el repositorio de Python, Mediapipe, del 90% de precisión para la detección postural de landmarks.

Adicionalmente, se observó visualmente la detección de las fallas posturales correspondientes a errores técnicos, en la realización de la sentadilla con barra ya mencionadas adecuadamente y dentro de los parámetros esperados.

Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

En conclusión, este proyecto ofreció una visión integral sobre la importancia del entrenamiento de fuerza, en particular el ejercicio de sentadilla con barra, en el contexto de la salud física y el bienestar general. La evidencia respalda la relevancia de abordar adecuadamente la técnica de la sentadilla para prevenir lesiones y maximizar los beneficios del ejercicio. La clasificación de las actividades de fortalecimiento muscular por parte de la Organización Mundial de la Salud como cuarto lugar en sus recomendaciones, subraya la importancia de este tipo de entrenamiento en la promoción de la salud musculoesquelética y la prevención de lesiones.

El enfoque adoptado en este proyecto, que combina la tecnología de visión por computadora con la biomecánica del movimiento humano, representa un avance significativo en la mejora de la técnica de la sentadilla. Esta innovación, se diseñó con la finalidad de ofrecerse como una herramienta adicional para los entrenadores y otros expertos

Profesionales de la Salud en instituciones o contextos deportivos, lo que podría ser muy útil en agilizar sus procedimientos, reduciendo tiempo de acompañamiento frente a frente en los entrenamientos personales y mejorando la precisión del entrenamiento, haciendo al usuario más independiente del acompañamiento presencial total.

La configuración implementada, que incorpora dos cámaras en los planos coronal y sagital de la persona en tiempo real, permitió identificar los errores más frecuentes en la ejecución de la sentadilla con barra, resaltándolos con color rojo y cambio en el texto. Estos errores, son responsables de muchas de las lesiones relacionadas con la sentadilla.

En resumen, este proyecto representa un paso importante hacia la integración de las tecnologías emergentes en el ámbito del entrenamiento deportivo. La convergencia de lo mencionado ofrece un enfoque innovador para abordar los desafíos asociados con la ejecución diversos deportes, con el potencial de mejorar la salud y el rendimiento físico de los usuarios.

Referencias

- [1] World Health Organization, "Physical activity," WHO. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>, 2022
- [2] M. Gómez, "La importancia del entrenamiento de fuerza," *SportLife*. [Online]. Available: https://www.sportlife.es/vida-sana/la-importancia-del-entrenamiento-de-fuerza_204465_102.html, 2023.
- [3] L. Romero, "En México: Más de 75% de la población presenta sobrepeso u obesidad," *Gaceta UNAM*. [Online]. Available: <https://www.gaceta.unam.mx/mas-de-75-de-la-poblacion-presenta-sobrepeso-u-obesidad/>, 2022.
- [4] L. Lardone, Factores de riesgo de lesiones asociados con el entrenamiento con pesas, IPEF, [En línea]. Disponible: <https://g-se.com/factores-de-riesgo-de-lesiones-asociados-con-el-entrenamiento-con-pesas-bp-A6282384c3b29e>, 2022.
- [5] C. Rojas, "Sensaciones Propioceptivas," [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/486212937/SENSACIONES-PROPIOCEPTIVAS>, 2024.
- [6] F. Ruíz, D. Tenesaca, and G. Apolo, "Análisis biomecánico de la sentadilla libre en el levantamiento de potencia en Quito," *Podium: Revista de Ciencia y Tecnología en la Cultura Física*, vol. 28, no. 1, pp. 76-79, Feb. 2009.
- [7] C. Blanco and A. Quitian, "Análisis biomecánico del ejercicio sentadilla libre en sujetos sin acondicionamiento físico," *Revista Ontare*. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/f8d2/2758ad1a89e09dd52004e4349b6b9f80d7ef.pdf>, 2018.
- [8] B. Sánchez and E. Aedo, "Biomecánica de la articulación de la rodilla durante la sentadilla: Una revisión sistemática," *Journal of Movement and Health*, vol. 19, no. 2, Art. No. 147, 2022
- [9] D. Toledo, "La sentadilla: biomecánica de la rodilla," *Revista digital EFDeportes*. [Online]. Available: <https://www.efdeportes.com/efd214/la-sentadilla-biomecanica-de-la-rodilla.htm>, 2015.
- [10] D. González, "¿Sentadilla correcta o incorrecta? 5 errores típicos al hacer sentadilla," *Fisionline*. [Online]. Available: <https://www.fisioterapia-online.com/videos/sentadilla-correcta-e-incorrecta-5-errores-tipicos-al-hacer-sentadillas>, 2018.
- [11] J. Aguilar, "Las terribles consecuencias de una sentadilla mal hecha," *Deporte Saludable*. [Online]. Available: <https://deportesaludable.com/salud/lesiones/las-terribles-consecuencias-una-sentadilla-mal-hecha/>, 2017.
- [12] J. Lara, "Prevención de lesiones en ejercicios de musculación: sentadillas," *Vitónica*. [Online]. Available: <https://www.vitonica.com/musculacion/prevencion-de-lesiones-en-ejercicios-de-musculacion-i-sentadillas>, 2018.
- [13] J. Martínez, "Sistema de Visión artificial para la detección y corrección de posturas en ejercicios realizados por fisicoculturistas," Tesis UAEM. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/95190>, 2018.
- [14] K. Reddy, "Real-time exercise posture correction using human pose detection technique," SUNY Polytechnic Institute. [Online]. Available: https://soar.suny.edu/bitstream/handle/20.500.12648/8622/598_N%20Boyalla%20Final_Report.pdf?sequence=1&isAllowed=y, 2021.
- [15] Remolinator, "Detección de objetos en tiempo real utilizando Python y la librería OpenCV," [Online]. Available: <https://remolinator.com/deteccion-de-objetos-en-tiempo-real-utilizando-python-y-la-libreria-opencv/>, 2020.
- [16] Python, "MediaPipe 0.10.11," [Online]. Available: <https://pypi.org/project/mediapipe/>, 2024.

-
- [17] G. McIntire, B. Martin, and L. Washington, “Python Pandas Tutorial: A complete introduction for beginners,” [Online]. Available: <https://www.learndatasci.com/tutorials/python-pandas-tutorial-complete-introduction-for-beginners/>, 2024.
 - [18] NumPy, “NumPy: the absolute basics for beginners,” [Online]. Available: https://numpy.org/doc/stable/user/absolute_beginners.html, 2022.
 - [19] Matplotlib, “Matplotlib: Visualization with Python,” [Online]. Available: <https://matplotlib.org/>, 2023.
 - [20] GeeksforGeeks, “Python: Introduction to PyQt5,” [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/python-introduction-to-pyqt5/>, 2022.
 - [21] Pypi. Python: "Mediapipe", [Online]. Available: <https://pypi.org/project/mediapipe/>, 2024