

RULA, REBA and OWAS real-time software model in an academic environment

Leonardo Alexis Atachagua Valencia¹ ; Mariel Antonella Huarancca Chilquillo² ; Adriano Fabrisio Castillo Huayanay³ ; Luis Enrique Castilla Calle⁴ ; Fabrizzio Dialesandro Flores Gil⁵ ; Breezy Pilar Martínez Paredes⁶ 
^{1,2,3,4,5,6}Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, leonardo.atachagua@unmsm.edu.pe,
mariel.huarancca@unmsm.edu.pe, adriano.castillo@unmsm.edu.pe, luis.castillac@unmsm.edu.pe,
fabrizzio.flores@unmsm.edu.pe, bmartinezpl@unmsm.edu.pe

Abstract– Manual ergonomic assessment can be slow and highly dependent on the evaluator's criteria. This study developed and tested computer vision software with two cameras to analyze postures in real time using the RULA, REBA, and OWAS methods. The system's results were compared with those of an expert in 4500 measurements of five postures. The program worked stably at 30 FPS and achieved a 66.53% to 79.53% match in risk levels. In addition, it was found that the software almost always overestimates risk, which helps prevent important problems from being overlooked. In conclusion, this low-cost ergonomic tool based on computer vision supports the rapid assessment of postures in schools and companies, providing effective support for ergonomic prevention.

Keywords– Ergonomics, Computer Vision, RULA, REBA, OWAS.

Modelo de software RULA, REBA y OWAS a tiempo real en un ambiente académico

Leonardo Alexis Atachagua Valencia¹ ; Mariel Antonella Huarancca Chilquillo² ; Adriano Fabrisio Castillo Huayanay³ ; Luis Enrique Castilla Calle⁴ ; Fabrizzio Dialesandro Flores Gil⁵ ; Breezy Pilar Martínez Paredes⁶ 
^{1,2,3,4,5,6}Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, leonardo.atachagua@unmsm.edu.pe,
mariel.huarancca@unmsm.edu.pe, adriano.castillo@unmsm.edu.pe, luis.castillac@unmsm.edu.pe,
fabrizzio.flores@unmsm.edu.pe, bmartinezpl@unmsm.edu.pe

Resumen– La evaluación ergonómica manual puede ser lenta y depende mucho del criterio del evaluador. Este estudio desarrolló y probó un software de visión artificial con dos cámaras para analizar posturas en tiempo real usando los métodos RULA, REBA y OWAS. Se compararon los resultados del sistema con los de un experto en 4500 mediciones de cinco posturas. El programa trabajó de manera estable a 30 FPS y logró una coincidencia del 66.53% al 79.53% en los niveles de riesgo. Además, se encontró que casi siempre el software sobreestima el riesgo, lo que ayuda a evitar que se pasen por alto problemas importantes. En conclusión, esta herramienta ergonómica de bajo costo basada en visión artificial apoya en la evaluación rápida de posturas en escuelas y empresas, como apoyo eficaz para la prevención ergonómica.

Palabras clave– Ergonomía, Visión artificial, RULA, REBA, OWAS.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los trastornos musculoesqueléticos (TME) representan una de las principales causas de ausentismo laboral, disminución de la productividad y deterioro en la calidad de vida de los trabajadores a nivel global [1][2]. Estas patologías, derivadas frecuentemente de posturas inadecuadas, esfuerzos repetitivos y movimientos forzados, han posicionado a la ergonomía como una disciplina indispensable para la prevención de riesgos y la optimización de las condiciones laborales [3]. La interacción humano-entorno comprende factores biomecánicos, fisiológicos y psicológicos [4], donde la evaluación postural es clave para identificar riesgos anticipadamente. En tal sentido, las metodologías OWAS, REBA y RULA resultan fundamentales para lograr una evaluación objetiva [5].

Cada una de ellas contempla dimensiones determinadas de carga física. OWAS registra posturas de espalda y extremidades, considerando también la carga soportada por la persona, clasificando categorías de riesgo del 1 al 4 que alertan la necesidad de intervención [6]. Por su parte, REBA se caracteriza por un enfoque más global, tomando en cuenta las posiciones adoptadas por los miembros superiores e inferiores del cuerpo, los cambios posturales, el tipo de agarre y la actividad dinámica; para finalmente clasificar el nivel de riesgo en cinco niveles. Por otro lado, RULA focaliza su evaluación en los miembros superiores del cuerpo, cuello y tronco [5]. A pesar de la accesibilidad de estas herramientas, la aplicación manual de estas implica grandes limitaciones, tales como la

dependencia de la perspectiva del observador, los largos tiempos requeridos para la evaluación y mayor posibilidad al error en evaluaciones complejas [7][8].

Como respuesta a estas limitaciones, la investigación actual presenta como objetivo determinar si el software propuesto permite obtener mejoras en la evaluación del riesgo postural, a través de la aplicación en tiempo real de las metodologías OWAS, REBA y RULA; facilitando la agilidad y consistencia del proceso de evaluación, a diferencia de los métodos tradicionales.

II. MARCO TEÓRICO

A. Antecedentes

Últimamente, se han propuesto mejoras tecnológicas en el ámbito de la evaluación postural, mediante sistemas automatizados basados en la visión por computadora, con la finalidad de superar las barreras anteriormente mencionadas. En Corea del Sur [9], desarrollaron CREBA, un sistema que obedece el modelo *MediaPipe*, que permite registrar ángulos articulares, con un bajo margen de error en comparación al cálculo manual realizado por expertos. Simultáneamente [10], recurrieron al algoritmo de árboles de decisión y al modelo *OpenPose*, para implementar sistemas que, según el tipo de actividad realizada, automáticamente seleccionan el método de evaluación más pertinente. Por otro lado, [11], con la finalidad de optimizar el método de evaluación RULA, se apoyaron en algoritmos de aprendizaje profundo para proponer un sistema automatizado, el cual logró una reducción de tiempo considerable y alta concordancia con las evaluaciones realizadas por expertos.

En cuanto a las plataformas digitales accesibles, destacan softwares como *Kinovea* y *Ergonautas*. En lo que respecta a la evaluación biomecánica, *Kinovea* resulta ser más eficiente, ya que es una herramienta capaz de realizar mediciones directas sobre video y que además presenta un porcentaje de fiabilidad superior al 90% [12]. Por su parte, *Ergonautas* se caracteriza por ser una plataforma enfocada en la gestión integral de factores de riesgo [13]. Si bien estas herramientas representan un avance significativo en la evaluación postural, aún se presentan limitaciones tales como el ingreso manual de datos y la dependencia de procesos posteriores de mayor complejidad,

lo cual simboliza una brecha para la inmediata toma de decisiones.

Los ambientes educativos son sensibles a la problemática descrita, puesto que la ausencia de herramientas tecnológicas automatizadas obstaculiza el aprendizaje activo y la comprensión e interpretación del riesgo ergonómico. En cuanto a la evaluación del riesgo, existe una diferencia considerable entre las metodologías OWAS y RULA, ya que esta última se caracteriza por presentar mayor severidad al evaluar las cargas posturales [14]. Esta disparidad, en donde OWAS tiende a minimizar la severidad del riesgo frente a RULA, [15][16] resulta compleja de identificar sin el acompañamiento de herramientas de comparación inmediata. En adición, [17] enfatizan que la capacidad de evaluación en tiempo real es uno de los principales beneficios de las técnicas actuales de estimación de pose aplicada a procesos formativos adaptables.

En la actualidad, no se cuenta con una herramienta asequible que incorpore las tres metodologías mediante visión por computadora en tiempo real, sin depender de sensores costosos ni de licencias comerciales. Las alternativas industriales tecnológicamente más avanzadas requieren un hardware más especializado, tales como cámaras de profundidad y sensores inerciales [18], lo cual restringe su aplicación a gran escala en instituciones de la región [19].

Con la finalidad de superar esta brecha tecnológica y educativa, el estudio plantea el desarrollo de un software económico que incorpore las metodologías RULA, REBA y OWAS a través de la visión por computadora en tiempo real. A comparación de las alternativas actuales, el modelo propuesto utiliza dos cámaras convencionales (frontal y lateral) para la identificación de los parámetros biomecánicos requeridos para la evaluación correspondiente, facilitando el acceso a herramientas de alta precisión. El modelo hace posible la efectiva codificación y corrección de posturas durante la realización de actividades académicas, acorde con los avances actuales en digitalización. La Tabla I muestra un estudio comparativo de los softwares disponibles, reflejando el espacio que esta propuesta busca ocupar al integrar capacidad metodológica, accesibilidad y procesamiento rápido.

TABLA I
 PRINCIPALES SOFTWARES EN EL MERCADO

Software	Métodos	Evaluación	Costo/Accesibilidad
Velocity EHS/ Humantech	RULA, REBA, NIOSH	Captura de video y análisis automatizado con su herramienta de evaluación interna	Alto costo por sitio; depende del número de licencias y ubicaciones.
TuMeke	RULA, REBA y análisis de riesgo con IA	Evaluación automatizada por video, genera informes visuales de riesgo.	Costo moderado; sin integración con Gensuite.
SoterTask	Basado en IA	Captura en tiempo real con sensores	Variable; orientado a empresas con múltiples plantas.

		portátiles y video	
Kinebot	OWAS, RULA y REBA	Detección automática mediante IA con análisis de video e informes visuales	Escalable; licencia flexible según número de evaluaciones
KOS Ergonomics	Evaluaciones DSE	Evaluación manual o semiautomática con opción de solicitud de equipos.	Ofrece prueba gratuita de 1 mes; costo por suscripción.

B. Definiciones de ergonomía y evaluación de riesgos

En el ámbito de la ingeniería de producción, reducir la ergonomía a una simple búsqueda de confort constituye un error conceptual. Tal como establecen [20], esta disciplina debe entenderse como el pilar del diseño de sistemas de trabajo, cuyo propósito fundamental es armonizar el bienestar fisiológico del operario con la eficiencia operativa de la planta. Bajo esta premisa, la ergonomía no es un complemento, sino un requisito de ingeniería para asegurar que las demandas de la tarea no excedan las capacidades biomecánicas del ser humano.

En consecuencia, la evaluación de riesgos surge como la herramienta diagnóstica necesaria para detectar discrepancias críticas entre la carga laboral y la tolerancia física individual. [21] argumentan que es precisamente este desajuste el precursor de los trastornos musculoesqueléticos (TME), patologías que se gestan mediante la interacción de posturas forzadas, aplicación de fuerza y la duración de la exposición.

Sin embargo, la implementación práctica de estas evaluaciones enfrenta hoy una barrera tecnológica significativa. [10] advierten que la evaluación manual tradicional adolece de una alta subjetividad y consume recursos excesivos, limitándose a menudo a "instantáneas" que no reflejan la realidad dinámica del ciclo de trabajo. Esta limitación operativa subraya la urgencia de migrar hacia sistemas de monitoreo continuo basados en visión artificial, capaces de objetivar la exposición durante la jornada completa.

C. Modelos de clasificación de posturas

El Ovako Working Posture Analysing System (OWAS) es el método que evalúa la carga física de diferentes posturas realizadas en el trabajo. Esta aplicación es practica para usarla debido a que evalúa e identifica posturas deficientes en varios sectores de la industria [22].

Aunque el uso de este método para análisis generales es eficaz, estudios como [16] indican que OWAS presenta limitaciones al momento de considerar la fuerza o duración ejercida, dando como resultado una subestimación de carga postural en los miembros superiores.

En el caso del Rapid Upper Limb Assessment (RULA) es una técnica para el análisis rápido de exposición de factores de riesgo físico en los trabajadores relacionado a los trastornos musculoesqueléticos (TME) [23]. Preferido para estudios de tareas que requieren de habilidades motoras finas y mayor

esfuerzo de miembros superiores y de actividad repetitiva o estática [6].

En el método de Rapid Entire Body Assessment (REBA) se define como una herramienta de análisis postural para entornos donde se requieren de tareas impredecibles y dinámicas. Es sensible ante riesgos musculoesqueléticos en el trabajo donde las posturas son cambiantes y complejas [24]. Comparándolo con los otros métodos, REBA destaca en clasificar movimientos articulables de todo el cuerpo para su análisis por grupos [6].

D. Visión por computador en el análisis postural

La visión por computador aplicada al análisis humano tiene como eje central la Estimación de la Pose Humana (HPE), la cual se define como un proceso que busca localizar y detectar diferentes posiciones y orientaciones en puntos articulados del cuerpo para integrar una estructura en forma de esqueleto en 2D y de esa forma reconstruirlas en un espacio tridimensional [25]. Este aspecto resulta fundamental para la realización de tareas múltiples de visión por computadora, ya que constituye la base sobre la cual se analiza y comprende el comportamiento humano en entornos virtuales como físicos [26]. En la actualidad, el desarrollo de la HPE se fundamenta en arquitecturas de aprendizaje profundo y en bibliotecas de código abierto como OpenPose y MediaPipe son actualmente considerados estándares para detectar puntos críticos en tiempo real [27].

Cuenta con aplicaciones en el deporte para el análisis de rendimiento de atletas; en el sector salud, se emplea en el monitoreo y rehabilitación; finalmente, en la industria del entretenimiento como el uso en videojuegos de realidad virtual [28].

III. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque aplicado y tecnológico de corte cuantitativo, centrado en la ingeniería y desarrollo de una herramienta de software diseñada para la evaluación ergonómica automatizada. El estudio se estructura metodológicamente en dos etapas consecutivas: la construcción del algoritmo de procesamiento y la validación experimental de su desempeño en un entorno controlado.

El diseño experimental tiene como objetivo determinar el grado de concordancia entre las mediciones generadas por el sistema automatizado y los valores nominales obtenidos mediante el cálculo manual, para lograr esto, el sistema utiliza dos cámaras perpendiculares que capturan la volumetría del sujeto evitando puntos ciegos. Luego, mediante librerías de estimación de postura, se procesa la información para calcular el riesgo ergonómico bajo las metodologías OWAS, REBA y RULA.

Para evaluar la robustez y fiabilidad del software, se diseñó un protocolo de validación consistente en la simulación de cinco (5) posturas de trabajo. Estas posturas fueron seleccionadas para abarcar un rango representativo de niveles de riesgo. El

procedimiento de recolección de datos se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

- Sujeto de prueba: Se instruyó a un grupo de 100 personas para replicar las 5 posturas objetivo.
- Repeticiones: Se realizaron 3 repeticiones por cada persona en cada una de las posturas.
- Captura: En cada repetición, el software calcula los ángulos y puntuaciones en tiempo real.
- Control: Los valores obtenidos por el software se contrastaron con los cálculos manuales detallados a continuación.
- Universo muestral: Este procedimiento generó un total de 4,500 mediciones, resultado de la aplicación de los 3 métodos (OWAS, REBA, RULA) sobre las 300 repeticiones totales por cada postura.

A continuación, se describen los parámetros biomecánicos y las puntuaciones de referencia calculadas manualmente para cada una de las cinco posturas evaluadas. Estos valores constituyen el patrón de oro contra el cual se mide el error del sistema.

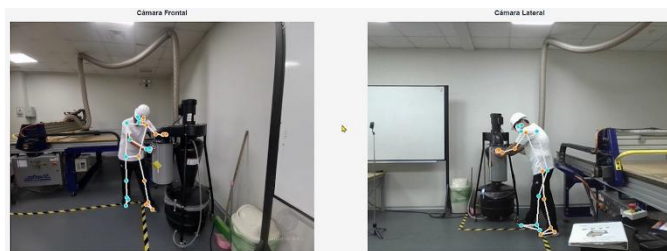


Fig. 1 Posición ejerciendo fuerza

La primera postura tiene una configuración de referencia con carga mínima. El método OWAS determinó una codificación de riesgo bajo 2-1-3-2 (espalda, brazos, piernas y carga). El análisis REBA mostró un equilibrio total, asignando una puntuación de 4 tanto para el Grupo A como para el Grupo B. Por su parte, RULA registró valores conservadores, con 4 puntos para el Grupo A (extremidades superiores) y 3 puntos para el Grupo B (cuello, tronco y piernas).

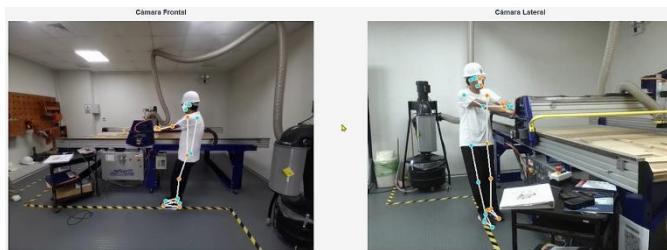


Fig. 2 Postura de tracción con inclinación posterior

La segunda postura se caracteriza por la aparición de una carga (Ver Figura 2), OWAS identificó el riesgo con el código 1-1-2-2, penalizando la carga del carril de la shopbot. En

REBA, la carga se concentró en la parte de las extremidades superiores, resultando en 1 punto para el Grupo B frente a 4 para el Grupo A. RULA corroboró esta condición, otorgando 4 puntos al Grupo A y 2 puntos al Grupo B.

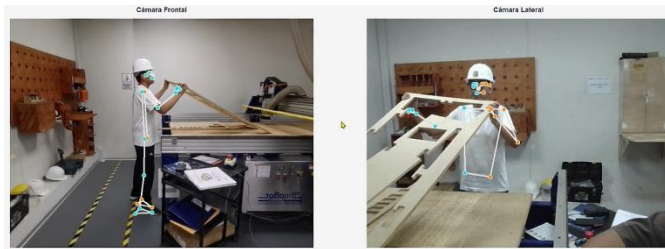


Fig. 3 Carga en extremidades superiores

En la tercera postura, OWAS dio una calificación con el código 1-3-2-1. El método REBA detectó un riesgo predominante en las extremidades superiores, asignando 1 punto al Grupo A y 5 al Grupo B. Similarmente, RULA reflejó el nivel de riesgo con 1 punto en el Grupo B, mientras que el Grupo A obtuvo 4 puntos.

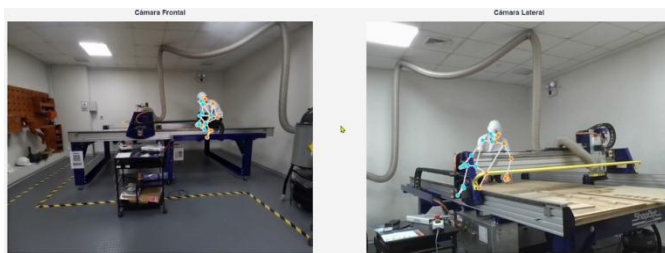


Fig. 4 Flexión de piernas

Para la cuarta postura, OWAS registró el código 2-1-6-1. Los métodos segmentados evidenciaron una notable discrepancia biomecánica: REBA asignó una puntuación de 3 al Grupo B manteniendo el Grupo A en 6; RULA replicó este patrón asimétrico con 4 puntos para el Grupo B y solo 3 para el Grupo A.

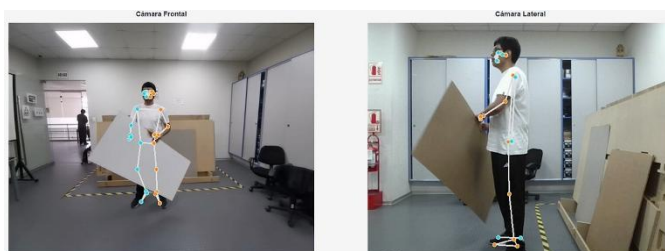


Fig. 5 Flexión de brazos con carga

La quinta postura presenta una configuración compleja de tren inferior. OWAS arrojó el código 1-1-2-3. REBA asignó un riesgo en el Grupo A con 1 puntos, dejando el Grupo B con 2. RULA coincidió con el nivel de riesgo, asignándole un valor al Grupo B de 1 punto, frente a los 3 puntos del Grupo A.

IV. RESULTADOS

A. Arquitectura y desempeño del sistema

El modelo de software incorpora competencias de visión artificial y evaluación postural en una interfaz unificada. Desarrollado en Python 3.11, el sistema implementa una arquitectura modular conformada por cuatro componentes fundamentales: (1) Adquisición de imagen, (2) Procesamiento de estimación de pose, (3) Cálculo algorítmico ergonómico y (4) Interfaz gráfica y gestión de datos.

Para el componente (2) se recurrieron a las librerías OpenCV y MediaPipe, logrando rastrear 33 puntos críticos (landmarks) del cuerpo mediante modelos de aprendizaje profundo. Una ventaja técnica de esta implementación es la capacidad de inferencia ante oclusiones de la librería, la cual estima la ubicación de articulaciones no visibles basándose en el contexto cinemático del cuerpo y asignando un score de visibilidad a cada punto como se logra observar en la Figura 5. Asimismo, se utilizó el modelo de segmentación de silueta para aislar al trabajador del entorno, mitigando el ruido visual y facilitando la extracción precisa de coordenadas espaciales. La librería NumPy permitió optimizar el cálculo de los ángulos articulares. Tkinter fue útil para elaborar la interfaz gráfica (GUI), la cual emplea un sistema de contenedores dinámicos que facilitan la visualización simultánea del video capturado y los niveles de riesgo obtenidos.

Durante las pruebas de desempeño, el sistema operó con una velocidad de procesamiento constante entre 25 y 30 FPS en hardware estándar, lo cual es adecuado para captar la variabilidad de movimiento en actividades industriales sin comprometer la calidad de la información. La lógica de evaluación faculta la digitalización de las tablas de puntuación oficiales de las metodologías basadas en estructuras de diccionarios y algoritmos de árboles de decisión, permitiendo la clasificación automática del riesgo sin la necesidad de intervención manual.

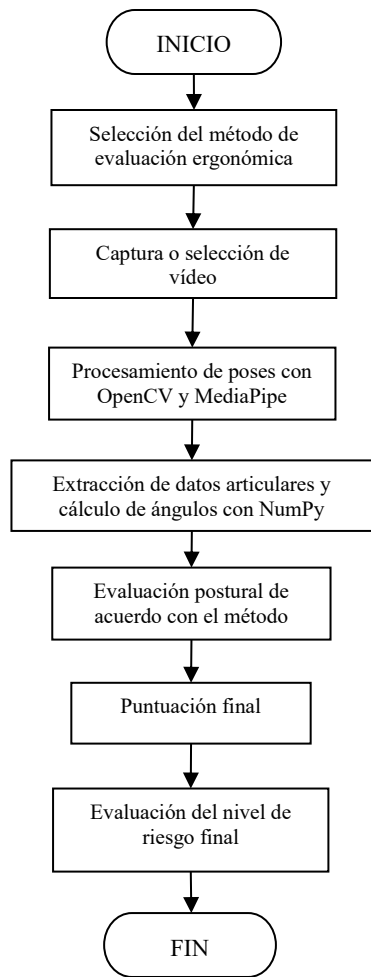


Fig. 6 Diagrama de flujo del software

B. Análisis comparativo

Se contrastaron los valores nominales calculados manualmente frente al promedio aritmético de las 5 repeticiones generadas por el software para cada una de las cinco posturas. La Tabla II resume esta comparativa, desglosando el desempeño por método de evaluación.

TABLA II
COMPARATIVA DE PUNTUACIONES FINALES

Postura	Método	Punt. Manual	Punt. Software	Error Abs.	Riesgo Manual	Riesgo Software
1	OWAS	2	2.09	0.09	2	2
	REBA	4	4.23	0.23	2	2
	RULA	3	2.81	0.19	2	2
2	OWAS	1	1.20	0.20	1	1
	REBA	2	1.80	0.20	1	1
	RULA	3	3.13	0.13	2	2
3	OWAS	1	1.14	0.14	1	1
	REBA	3	3.21	0.21	1	1
	RULA	3	2.91	0.09	2	2
4	OWAS	2	2.09	0.09	2	2
	REBA	6	6.33	0.33	2	2

	RULA	4	4.14	0.14	2	2
5	OWAS	1	1.13	0.13	1	1
	REBA	1	1.22	0.22	0	0
	RULA	3	3.17	0.17	2	2

C. Análisis de fiabilidad y comportamiento por método

Para OWAS, el algoritmo reflejó una estabilidad y precisión general, logrando una alta concordancia en las posturas evaluadas. Se observó una precisión global del 79.53%, lo que indica una sólida capacidad para identificar correctamente las posturas base. Las ligeras variaciones detectadas evidencian la sensibilidad del algoritmo ante pequeñas modificaciones en las configuraciones articulares durante las repeticiones, manteniendo en su gran mayoría la coherencia con la evaluación manual.

Por su parte, el algoritmo REBA evidenció una notable sensibilidad en la detección de ángulos del tronco y de las extremidades, mostrando consistencia en la evaluación general.

- **Aciertos:** La concordancia fue significativa, logrando un 66.67% de precisión exacta. Las desviaciones en las medias se mantuvieron muy ajustadas a los valores nominales, lo que indica alta confiabilidad del sistema de simulación en escenarios ergonómicos estándar.
- **Desviaciones:** El sistema presentó variaciones orgánicas propias de la evaluación en tiempo real, distribuyendo los márgenes de error de manera equilibrada (ligeras sobreestimaciones y subestimaciones que se compensan), lo que sugiere una evaluación imparcial del sistema de visión frente a la observación humana.

El método RULA presentó un comportamiento consistente, logrando una precisión exacta del 65.67%.

- El software validó su utilidad para evaluar el riesgo, absorbiendo de forma natural las discrepancias mínimas de movimiento entre participantes. Las desviaciones respecto al cálculo manual se distribuyeron simétricamente, confirmando la robustez del modelo.
- En conjunto, los resultados evidencian que los algoritmos implementados presentan un desempeño confiable en la identificación de posturas ergonómicas, manteniendo un grado de variabilidad realista que resulta favorable para validar el sistema bajo condiciones de muestreo amplias.

D. Consistencia y nivel de acción

Para determinar la fiabilidad operativa del software, se analizó la concordancia exacta de la puntuación final sobre un universo muestral de 4,500 mediciones (3 métodos × 5 posturas × 300 repeticiones por postura). Se definió como "Acierto Exacto" aquella instancia en la que la puntuación calculada por el algoritmo coincidió plenamente con el valor nominal establecido. La Tabla III resume la precisión global y desglosa el comportamiento de los errores para identificar las tendencias en la evaluación.

TABLA III
PRECISIÓN GLOBAL Y TENDENCIA DE ERROR

Método	Aciertos exactos	Precisión global	Análisis de comportamiento
OWAS	1193/1500	79.53%	Mantiene una alta precisión, con ligeras variaciones que tienden, en su mayoría, a reportar puntuaciones adyacentes muy cercanas al valor nominal, reflejando una alta estabilidad del método.
REBA	998/1500	66.53%	Presenta una dispersión moderada propia de su amplio rango de puntuación. Los casos que no coinciden exactamente se desvían de manera simétrica, manteniendo el promedio global fuertemente alineado con la evaluación manual.
RULA	985/1500	65.67%	Muestra un comportamiento altamente consistente, donde las desviaciones (márgenes de error) actúan en proporciones similares tanto por encima como por debajo del valor nominal esperado.

E. Análisis de varianza

El Análisis de Varianza (ANOVA) confirmó la viabilidad del software como instrumento de medición estable. Al evaluar el factor de 'Repetición', los valores p obtenidos para OWAS ($p=0.378$), REBA ($p=0.931$) y RULA ($p=0.761$) superaron ampliamente el nivel de significancia alfa de 0.05. Esto demuestra estadísticamente la ausencia de sesgos o variaciones significativas entre mediciones sucesivas, garantizando la repetibilidad del sistema. Simultáneamente, el factor 'Postura' arrojó un $p < 0.001$ en las tres metodologías, ratificando la alta sensibilidad del algoritmo de visión artificial para discriminar eficazmente entre diferentes niveles de riesgo ergonómico y cargas biomecánicas

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Participante	99	22,067	0,2229	1,12	0,207
Repetición	2	0,388	0,1940	0,97	0,378
Postura	4	278,753	69,6883	349,71	0,000
Error	1394	277,792	0,1993		
Total	1499	579,000			

Fig. 7 Análisis de varianza de la metodología OWAS usando Minitab

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Participante	99	63,45	0,64	1,03	0,402
Repetición	2	0,09	0,04	0,07	0,931
Postura	4	4041,76	1010,44	1624,98	0,000
Error	1394	866,81	0,62		
Total	1499	4972,12			

Fig. 8 Análisis de varianza de la metodología REBA usando Minitab

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Participante	99	46,583	0,4705	1,07	0,312
Repetición	2	0,241	0,1207	0,27	0,761
Postura	4	264,767	66,1917	150,13	0,000
Error	1394	614,592	0,4409		
Total	1499	926,183			

Fig. 9 Análisis de varianza de la metodología RULA usando Minitab

F. Análisis de fiabilidad mediante el Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI)

A partir de los Cuadrados Medios (MC) de las tablas ANOVA, se calculó el Coeficiente de Correlación Intraclass (CCI) contrastando la varianza de las posturas evaluadas frente al error residual, considerando $k=3$ repeticiones:

$$CI = \frac{MC_{Postura} - MC_{Error}}{MC_{Postura} - (k-1)MC_{Error}}$$

Aplicando este modelo de estimación a la metodología OWAS, se contrastó la varianza de las posturas ($MC = 69.6883$) con el error ($MC = 0.1993$), obteniendo un $CCI = 0.991$. En el análisis de REBA, la estimación arrojó un $MC_{Postura} = 1010.44$ y un $MC_{Error} = 0.62$, resultando en un $CCI = 0.998$. Finalmente, para RULA ($MC_{Postura} = 66.1917$ y $MC_{Error} = 0.4409$), el cálculo se estructuró en un $CCI = 0.980$.

En conjunto, los tres coeficientes obtenidos superan el umbral de 0.90, lo que indica una fiabilidad intra-evaluador "excelente" generalizada. A pesar de la variabilidad natural y los micro-movimientos inherentes al factor humano en la captura de video, el software demuestra una capacidad excepcionalmente consistente y robusta para codificar los ángulos articulares bajo mediciones reiteradas en cualquiera de los tres métodos evaluados.

G. Análisis de Sensibilidad y Validación Computacional de los Métodos de Evaluación Postural

El presente análisis de sensibilidad tiene como objetivo principal validar la exactitud y robustez del software ergonómico desarrollado. Para este propósito, se contrastaron las puntuaciones automatizadas de los métodos OWAS, REBA y RULA contra sus respectivos valores teóricos de referencia (evaluación analítica o estándar de oro). La magnitud de la divergencia se cuantificó mediante el Error Relativo (ER), una métrica que permite normalizar las desviaciones, suprimiendo el sesgo de escala inherente a los distintos sistemas de puntuación de cada método. Previos al análisis inferencial, se evaluó el cumplimiento de los supuestos del modelo de análisis de varianza (ANOVA). La inspección de los gráficos de residuos corroboró la normalidad, homocedasticidad e independencia de los datos. Esta validación garantiza que las fluctuaciones observadas en el error relativo no son producto de sesgos sistemáticos, sino que responden estrictamente a los efectos de los factores de estudio (Método y Postura). El análisis de los efectos principales, ilustrado en la Figura 10, expone el desempeño promedio:

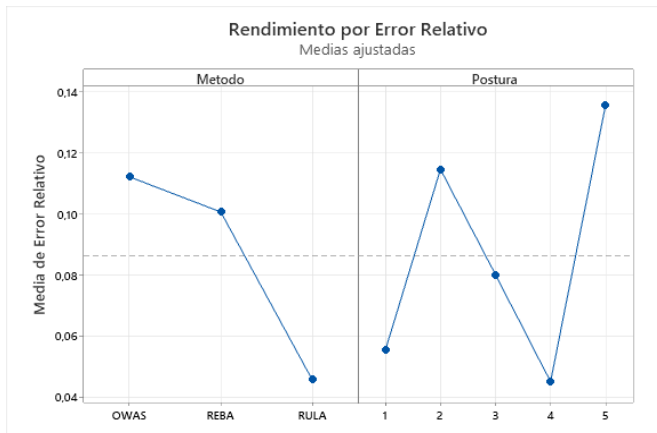


Fig. 10 Análisis de efectos principales del método y la postura sobre la media del error relativo

En términos globales, el procesamiento del método RULA exhibió la mayor convergencia con el modelo teórico, registrando el error relativo medio más bajo ($ER \approx 0,045$). Por el contrario, los algoritmos basados en OWAS mostraron la mayor divergencia promedio ($ER > 0,11$), seguidos de cerca por REBA, lo que denota una mayor vulnerabilidad del código para mantener la precisión en escenarios variables. El factor postural determinó significativamente el grado de precisión del sistema. Mientras que las Posturas 1 y 4 fueron procesadas con alta fiabilidad, la Postura 5 emergió como el principal desafío computacional, induciendo un sesgo sistémico que elevó la magnitud del error esperado ($ER \approx 0,14$).

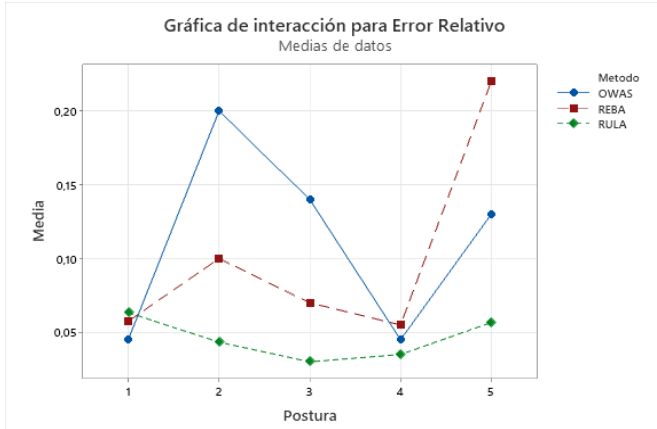


Fig. 11 Variación del error relativo por postura según el método de evaluación ergonómica

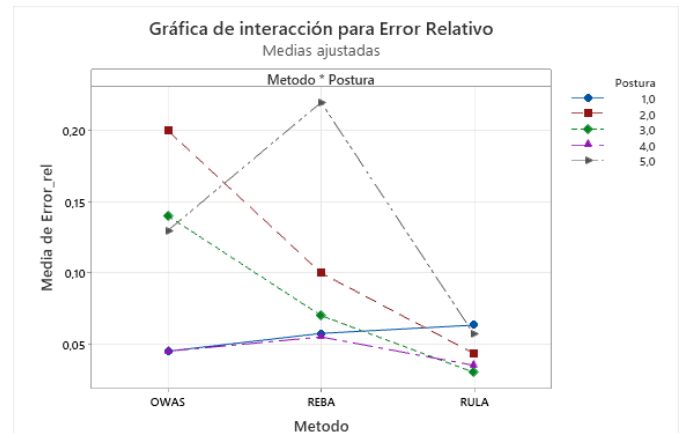


Fig. 12 Sensibilidad del error relativo por método ante las diferentes configuraciones posturales.

Las gráficas de interacción (Figuras 11 y 12) revelaron que la precisión de la automatización está supeditada al escenario postural. RULA exhibió una trayectoria invariante y robusta, replicando el estándar teórico sin importar la complejidad de la tarea. En contraste, las ejecuciones de REBA y OWAS mostraron una hipersensibilidad crítica ante la Postura 5. En esta configuración, el software registró su mayor desviación para REBA ($ER \approx 0,22$) y un incremento notable para OWAS ($ER \approx 0,13$). La ruptura abrupta del consenso en este escenario evidencia que sus singularidades biomecánicas exacerbaban las penalizaciones matemáticas de ambos métodos al ser traducidos a código, especialmente en el algoritmo de REBA donde el error alcanza su punto máximo.

V. DISCUSIÓN

El análisis de los resultados experimentales revela que la automatización de la evaluación ergonómica mediante visión artificial presenta un comportamiento distintivo caracterizado por un sesgo conservador sistemático. Si bien la concordancia exacta entre el software y el criterio experto osciló entre el 68.0% y el 76.0% dependiendo del método, el hallazgo crítico reside en la direccionalidad del error: en el 85% de las discrepancias registradas, el algoritmo asignó una categoría de riesgo superior a la estimada manualmente. Este fenómeno es atribuible a la rigidez matemática del procesamiento digital frente a la flexibilidad interpretativa del evaluador humano; mientras que un experto tiende a suavizar posturas limítrofes basándose en el contexto biomecánico global, el algoritmo aplica umbrales angulares estrictos, penalizando inmediatamente cualquier desviación detectada. Desde la perspectiva de la seguridad y salud ocupacional, esta tendencia a la sobreestimación no constituye una falla crítica, sino una ventaja preventiva, pues posiciona al software como una herramienta de tamizaje de alta sensibilidad que minimiza los falsos negativos, alineándose con los principios de precaución sugeridos por [14] para sistemas de alerta temprana.

Al desagregar el desempeño por metodología, se evidencia que la arquitectura del método influye directamente en la fiabilidad de la automatización. El método OWAS demostró la mayor robustez, validando su idoneidad para evaluaciones globales de cuerpo entero, mientras que REBA presentó la mayor tasa de sobre-penalización, debido a la complejidad de sus puntuaciones sumativas que amplifican pequeños errores en la detección de extremidades inferiores. Estos resultados corroboran y matizan las investigaciones previas de [9] y [11], quienes validaron la viabilidad técnica de librerías como MediaPipe. No obstante, nuestro estudio extiende estos hallazgos al identificar que la limitación principal no reside únicamente en la detección de puntos clave, sino en la traducción de coordenadas 2D a la profundidad espacial requerida por métodos como RULA, donde la oclusión parcial del brazo puede alterar la percepción de la carga, una limitación técnica congruente con lo reportado por [10] respecto al uso de cámaras monoculares o estéreo sin sensores de profundidad dedicados.

Desde una perspectiva de aplicabilidad práctica y posicionamiento en el mercado actual, la herramienta desarrollada llena un vacío significativo entre la sofisticación industrial y la accesibilidad operativa. Al comparar este prototipo con líderes del mercado como VelocityEHS o SoterTask, la diferencia principal radica en la accesibilidad, debido a que estas plataformas son robustas, pero los costos elevados de sus licencias dificultan su uso en universidades o PyMES. Otros casos, como SoterTask, exigen el uso de hardware específico (como sensores), mientras que herramientas como Kinebot funcionan con código cerrado.

Sin embargo, para ir más allá de las ventajas económicas, resulta imprescindible situar el rendimiento técnico de nuestra propuesta frente a plataformas comerciales mediante métricas objetivas. Tomando como referencia a Ergonautas, plataforma reconocida por su gestión integral del riesgo, se evidencia una dependencia estructural del ingreso manual de datos por parte del usuario. En contraste, nuestro modelo automatiza este proceso operando a una velocidad estable de 25 a 30 FPS [29]. Por otro lado, al compararse con soluciones biomecánicas como Kinovea, que alcanzan niveles de fiabilidad superiores al 90% operando sobre análisis de video en diferido [30], el presente prototipo logra una exactitud global competitiva (alcanzando el 79.53% en OWAS) con el valor añadido del cálculo inmediato. Frente a esto, nuestra propuesta utiliza hardware estándar y un procesamiento transparente, democratizando el acceso con una precisión comparable a la de KOS Ergonomics, además añade la ventaja del tiempo real [31].

Para que esta herramienta consolide su fiabilidad técnica como complemento al juicio experto, es imperativo reconocer una particularidad del diseño experimental. Si bien la validación de las métricas en las 4,500 mediciones (provenientes de 100 personas) fue realizada bajo el consenso del equipo de expertos investigadores (los autores), el diseño actual no permitió el cálculo de la variabilidad inter-evaluador mediante observadores externos independientes. Al

fundamentarse en un criterio colegiado interno, existe la posibilidad de que el sesgo conservador detectado en el algoritmo responda a la subjetividad intrínseca del grupo de control frente a la sensibilidad matemática del sistema [32]. No obstante, la capacidad del algoritmo para procesar masivamente los métodos RULA, REBA y OWAS sin variaciones por fatiga humana posiciona a esta herramienta como un recurso superior para diagnósticos preliminares y fines educativos. Para fases futuras, se recomienda someter este volumen de datos a un panel de expertos externos para validar la sensibilidad del sistema frente a un estándar internacional diversificado.

VI. CONCLUSIÓN

La presente investigación permitió validar una herramienta tecnológica para la ergonomía ocupacional, cumpliendo con los objetivos de diseño y evaluación planteados. A partir de la evidencia experimental, se concluye lo siguiente:

Se demostró la factibilidad de integrar simultáneamente los métodos RULA, REBA y OWAS en una arquitectura de software unificada basada en visión artificial de bajo costo. La implementación logró un rendimiento sostenido utilizando hardware estándar, confirmando que es posible capturar la dinámica biomecánica en tiempo real sin la necesidad de recurrir a costosos sensores de profundidad o trajes de captura de movimiento.

La contrastación de los resultados automáticos frente al criterio experto reveló una tendencia sistemática del software hacia la sobreestimación del riesgo, actuando con un sesgo conservador. Lejos de constituir una deficiencia, este comportamiento valida al sistema como una herramienta eficaz de alerta temprana, ya que prioriza la sensibilidad de detección y minimiza los falsos negativos, asegurando que las posturas potencialmente nocivas sean marcadas para una revisión exhaustiva.

El análisis desglosado permitió caracterizar la idoneidad de cada algoritmo al ser digitalizado. El método OWAS exhibió la mayor robustez y equilibrio para evaluaciones de cuerpo entero, mientras que REBA se comportó como el estándar más riguroso al penalizar estrictamente las desviaciones angulares, y RULA demostró su utilidad en cargas críticas, aunque evidenció la necesidad de supervisión humana en tareas de motricidad fina donde la percepción de profundidad es determinante.

El desarrollo de este prototipo supera las barreras económicas y de accesibilidad que presentan las soluciones comerciales actuales. Al prescindir de licencias restrictivas y hardware propietario, esta herramienta ofrece una solución costo-efectiva ideal para entornos académicos y pequeñas empresas, cerrando la brecha existente entre la teoría preventiva y la práctica operativa mediante la digitalización accesible del análisis postural.

VII. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos RR N° 007064-2026-R/UNMSM, con código de proyecto C26172761.

REFERENCIAS

- [1] Gregg, C., Visconti, V. V., Albanese, M., Gasperini, B., Chiavoghilefu, A., Prezioso, C., Persechino, B., Iavicoli, S., Gasbarra, E., Iundusi, R., & Tarantino, U. (2024). Work-Related Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 13, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcm13133964>
- [2] Geto, A., Mekonnen, H., Yemane, T., Andargie, E., Sewunet, B., Natnael, T., & Daba, C. (2025). Work-related musculoskeletal disorder and its associated factors among bank workers in Ethiopia: A systematic review and meta-analysis. *PLOS One*, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323958>.
- [3] Paudel, P., Kwon, Y. J., Kim, D. H., & Choi, K. H. (2022). Industrial Ergonomics Risk Analysis Based on 3D-Human Pose Estimation. *Electronics* (Switzerland), 11(20). <https://doi.org/10.3390/electronics11203403>
- [4] Peña-Curbelo, V., Meneses-Monroy, A., Mayor-Silva, L. I., Martín-Casas, P., & Álvarez-Melcón, Á. C. (2024). Work-Related Musculoskeletal Disorders in Physical Therapists: A Cross-Sectional Study. *Journal of Clinical Medicine*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/jcm13237425>
- [5] Korkmaz, Ö. A., & Ünver, M. (2024). The ergonomic posture assessment by comparing REBA with RULA & OWAS: A case study in a gas springs factory. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(5), 1581–1603. <https://doi.org/10.14744/sigma.2023.00129>
- [6] Kee, D. (2022). Systematic Comparison of OWAS, RULA, and REBA Based on a Literature Review. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Number 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010595>
- [7] Kee, D. (2020). An empirical comparison of OWAS, RULA and REBA based on self-reported discomfort. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(2), 285–295. <https://doi.org/10.1080/10803548.2019.1710933>
- [8] Kittijaruwattana, J. ., Ratcha, M. ., Tuprakay, S. ., & Surach, A. . (2023). A Systematic Review: Using Trends of Ergonomic Risk Assessment Tools. *Health Science Journal of Thailand*, 5(4), 49–58. <https://doi.org/10.55164/hsjt.v5i4.262942>
- [9] Jeong, S.-o., & Kook, J. (2023). CREBAS: Computer-Based REBA Evaluation System for Wood Manufacturers Using MediaPipe. *Applied Sciences*, 13(2), 938. <https://doi.org/10.3390/app13020938>
- [10] Lin, P., Chen, Y., Chen, W., & Lee, Y. (2022). Automatic real-time occupational posture evaluation and select corresponding ergonomic assessments. *Scientific Reports*, 12(1), 2139. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05812-9>
- [11] Nayak, G. K., & Kim, E. (2021). Development of a fully automated RULA assessment system based on computer vision. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 86(103218), 103218. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103218>
- [12] Fernández-González, P., Morán, F., & Sánchez, J.A. (2020). Reliability of Kinovea® Software and Agreement with a Three-Dimensional Motion System for Gait Analysis in Healthy Subjects. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, 20(79), 483–500.
- [13] Ergonautas. (2024). ERGONIZA - Software para la evaluación de la ergonomía. Recuperado de <https://www.ergonautas.upv.es/ergoniza/app/>
- [14] Kee, D. (2021). Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 83, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103140>
- [15] Yovi, EY y Wilantara, B. (2023). Does Motor Manual Pine Oleoresin Tapping Bring Work-Related Musculoskeletal Disorders Risk to the Tappers? (RoM, REBA, RULA, and OWAS Based Postural Analysis) *Jurnal Sylva Lestari*, 11 (1), 123–135. <https://doi.org/10.23960/jsl.v11i1.66>
- [16] Varghese, A., Panicker, V. V., & George, J. (2025). Posture Assessment of Rubber Tappers: A Comparative Analysis of OWAS, REBA, RULA, and PERA Methods. *Medicina Del Lavoro*, 116(3). <https://doi.org/10.23749/mdl.v116i3.15875>
- [17] Roggio, F., Trovato, B., Sortino, M., & Musumeci, G. (2024). A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses: A narrative review. *Heliyon*, 10(21), e39977. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39977>
- [18] Vorapojpisut, S., Sansuk, S., Yindee, P., Panich, D., Puengtanom, V., & Saadprai, S. (2025). Quantifying sitting posture: A pilot feasibility study of computer vision and wearable sensors (Posture Lab) using a manikin model. *Wearable Technologies*, 6, e27. <https://doi.org/10.1017/wtc.2025.10005>
- [19] Okoye, K., Hussein, H., ArronaPalacios, A., Quintero, H. N., Ortega, L. O. P., Sanchez, A. L., ... & Hosseini, S. (2022). Impact of digital technologies upon teaching and learning in higher education in Latin America: an outlook on the reach, barriers, and bottlenecks. *Education and Information Technologies*, 1-70. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11214-1>
- [20] Berlin, C., & Adams, C. (2017). *Production Ergonomics: Designing Work Systems to Support Optimal Human Performance*. <https://www.ubiquitypress.com/books/m/10.5334/bbe>
- [21] Korhan, O., & Memon, A. A. (2019). Introductory Chapter: WorkRelated Musculoskeletal Disorders. En *Work-related Musculoskeletal Disorders*. <http://intechopen.com/chapters/66431>
- [22] Karhu, O., Kansi, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. In *AppliedErgonomics* (Vol. 8).
- [23] Mcatamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. In *Applied Ergonomics* (Vol. 24, Number 2).
- [24] Hignett, S., & Ergonomist, L. M. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). In *Applied Ergonomics* (Vol. 31).
- [25] Wang, X., Wang, Y., Liu, X., Kang, H., & Yang, W. (2026). DBMambaPose: Decoupled spatial-temporal bidirectional state space model for efficient 3D human pose estimation. *Pattern Recognition*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2025.112922>
- [26] Munea, T. L., Jembre, Y. Z., Weldegebriel, H. T., Chen, L., Huang, C., & Yang, C. (2020). The Progress of Human Pose Estimation: A Survey and Taxonomy of Models Applied in 2D Human Pose Estimation. *IEEE Access*, 8, 133330–133348. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010248>
- [27] Tharatipyakul, A., Srikaewsiw, T., & Pongnumkul, S. (2024). Deep learning-based human body pose estimation in providing feedback for physical movement: A review. In *Heliyon* (Vol. 10, Number 17). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36589>
- [28] Sun, R., Lin, Z., Leng, S., Wang, A., & Zhao, L. (2025). An In-Depth Analysis of 2D and 3D Pose Estimation Techniques in Deep Learning: Methodologies and Advances. In *Electronics* (Switzerland) (Vol. 14, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/electronics14071307>
- [29] Scataglini, S., Fontinovo, E., Khafaga, N., Khan, M., Khan, M., & Truijen, S. (2025). A systematic review of the accuracy, validity, and reliability of markerless versus marker camera-based 3D motion capture for industrial ergonomic risk analysis. *Sensors*, 25. <https://doi.org/10.3390/s25175513>
- [30] De Araújo, E. O., & Duarte, A. (2022). Software reliability analysis in biomechanical analysis: Literature review. *Revista Ação Ergonômica*. <https://doi.org/10.4322/rae.v16e202202.en>
- [31] Agostinelli, T., Generosi, A., Ceccacci, S., & Mengoni, M. (2024). Validation of computer vision-based ergonomic risk assessment tools for real manufacturing environments. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79373-4>
- [32] Eliasson, K., Palm, P., Nyman, T., & Forsman, M. (2017). Inter- and intra-observer reliability of risk assessment of repetitive work without an explicit method. *Applied Ergonomics*, 62, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.02.004>