

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i2.991>

Optimización del Proceso de Ensamblaje de Bicicletas Mediante la Implementación de Realidad Aumentada para la Mejora de la Capacitación Operativa en la Industria 4.0

*Optimization of the Bicycle Assembly Process by Implementing Augmented Reality for
Improved Operational Training in Industry 4.0*

Jorge Steban Ramírez Jiménez

<https://orcid.org/0009-0002-5665-8058>

jorge.ramirez9918@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi

Latacunga – Ecuador

José Ezequiel Naranjo-Robalino

<https://orcid.org/0000-0002-2884-1667>

jose.naranjo0463@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi

Latacunga – Ecuador

Artículo recibido: 10 marzo 2025

- Aceptado para publicación: 20 abril 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El presente estudio aborda la optimización del proceso de montaje de bicicletas mediante la incorporación de la realidad aumentada (RA) como herramienta de formación en el contexto de la Industria 4.0. A partir del diagnóstico de las limitaciones propias del modelo tradicional de instrucción basado en la observación, tales como baja retención de conocimientos, largos tiempos de aprendizaje y alta incidencia de errores operativos, se propone el diseño e implementación de una aplicación de RA. Esta solución tecnológica permite al operador interactuar con representaciones tridimensionales, responder preguntas y recibir una retroalimentación inmediata, promoviendo un aprendizaje autónomo y contextualizado. El experimento, desarrollado en un entorno académico controlado, consistió en una comparación cuantitativa entre dos grupos, uno entrenado con el enfoque tradicional y otro con la aplicación basada en RA. Los resultados muestran mejoras significativas en los indicadores clave de rendimiento, con una disminución del 19,84% en los tiempos de entrenamiento, del 37,41% en los tiempos de ejecución y del 38,63% en la tasa de errores de ensamblaje. Estos resultados avalan la viabilidad de la realidad aumentada como recurso estratégico para transformar los procesos de formación industrial.

Palabras clave: realidad aumentada, optimización, procesos de ensamblaje, estudio de tiempos

ABSTRACT

This study addresses the optimization of the bicycle assembly process by incorporating augmented reality (AR) as a training tool in the context of Industry 4.0. Based on the diagnosis of the limitations inherent to the traditional model of instruction based on observation, such as low knowledge retention, long learning times and high incidence of operational errors, the design and implementation of an AR application is proposed. This technological solution allows the operator to interact with three-dimensional representations, answer questions and receive immediate feedback, promoting autonomous and contextualized learning. The experiment, developed in a controlled academic environment, consisted of a quantitative comparison between two groups: one trained with the traditional approach and the other with the AR-based application. The results show significant improvements in key performance indicators, with a 19.84% decrease in training times, a 37.41% decrease in execution times and a 38.63% decrease in error rate. These results support the viability of augmented reality as a strategic resource to transform industrial training processes.

Keywords: augmented reality, optimization, assembly process, time study

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, el avance de la tecnología ha sido cada vez más notable dentro de los diferentes entornos, y con ello la innovación en base a las nuevas tecnologías no se hace esperar, una de ellas es la aplicación de la realidad aumentada (RA) en los diferentes contextos de la vida cotidiana (Ivaschenko et al., 2018). La viabilidad de RA no se limita a un campo determinado, pues esta se ha empleado en diferentes ámbitos, como la medicina, la ingeniería, el deporte, la construcción, entre muchas otras. Un claro ejemplo de ello es la aplicación de la RA en el marketing, en donde permite al usuario interactuar con el contenido digital, superponiéndolo a su entorno físico en tiempo real (Rumokoy & Frank, 2025), o en el caso de la educación y la capacitación, proporcionando varios beneficios, por ejemplo, dentro de la educación sanitaria se ha logrado evidenciar como la aplicación de la RA mejora la absorción de conocimientos, especialmente en entornos con limitado conocimiento de las condiciones médicas (Hung et al., 2025). Prueba de ello es lo descrito por (Stavropoulou et al., 2025), en donde se menciona como la aplicación de la RA en la formación en unidades de cuidados intensivos ha generado un aumento en la confianza de los estudiantes y ha permitido la optimización de la interacción con equipos médicos avanzados. Esto se debe a que la RA permite interactuar con modelos 3D complejos, y emplearlos de una manera más didáctica para el beneficio del interesado, así lo demuestra su empleo en el aprendizaje de artes marciales, en donde a través de la RA los estudiantes logran visualizar técnicas complejas, mismas que mediante una guía interactiva, aportan una retroalimentación en tiempo real, facilitando el aprendizaje y eliminando la dependencia observacional del estudiante hacia el instructor (Nelson et al., 2025).

La RA se ha posicionado como una herramienta clave dentro de la industria 4.0, aplicándose dentro de diversos sectores como la logística, los procesos de manufactura, la capacitación operativa, etc, debido a la capacidad que posee para la superposición de información digital sobre un entorno físico, permite optimizar los distintos procesos, reduciendo errores y rediseñando la capacitación de los colaboradores en base a simulaciones didácticas e interactivas (Aburayya, 2024). Dentro del área manufacturera, se ha evidenciado como la RA implementada en fábricas inteligentes, facilita la asistencia a los operarios, mejorando la comprensión de los diferentes procesos y minimizando la carga cognitiva impuesta hacia los mismos (Syberfeldt et al., 2017). Así también, en lo que respecta a capacitación operativa, la RA es capaz de proporcionar instrucciones visuales, lo que, según (Garcia et al., 2024; K. J* & M. A. N, 2019), puede ayudar tanto a mejorar la precisión del ensamblaje, disminuyendo la tasa de errores en comparación a métodos tradicionales, como a reducir los tiempos empleados para la realización de las actividades del proceso.

Si bien algunos estudios han enfatizado los aportes de la RA en materia de retención de conocimientos y reducción de errores y tiempos, resulta preciso mencionar la necesidad de

desarrollar metodologías de adopción general de este tipo de tecnologías con evaluaciones a largo plazo (Khorrami Shad et al., 2024).

Al realizarse una comparativa, se puede evidenciar claramente los desafíos que conlleva mantener una estrategia de capacitación tradicional, particularmente en cuanto a retención de conocimientos, ya que, tal como lo menciona (Hou, 2024), se ha demostrado que el material de capacitación sin elementos visuales interactivos resulta ineficaz para garantizar la asimilación de las distintas actividades de un proceso, y por ende los operarios presentan una mayor dificultad para dominar las actividades de su proceso, generando un alto índice de errores, lo que repercute directamente en la productividad (Liu et al., 2022). En base a ello (Xue et al., 2024) exponen que mediante el empleo de RA se puede llegar a optimizar el tiempo de aprendizaje hasta en un 128% respecto a metodologías tradicionales, mejorando la eficiencia y minimizando los errores en la formación mediante experiencias inmersivas e interactivas (Sakr & Abdullah, 2024). A pesar de ello, al igual que toda nueva implementación, la aplicación de la RA tendrá que lidiar con la resistencia al cambio, debiéndose adaptar a los diferentes niveles de experticia (Guaña-Moya et al., 2024), sin mencionar la carencia de estudios que validen de manera cuantitativa el impacto de la RA en la retención de saberes y/o en la disminución de errores (Wang et al., 2024), puesto que si bien la implementación de la RA ha sido profundamente estudiada dentro de la industria 4.0 para el ámbito de la asistencia técnica o inclusive para el mantenimiento predictivo, en términos de capacitación operativa las investigaciones tienden a reducirse considerablemente (Morales Méndez & del Cerro Velázquez, 2024). Esto resulta en una pérdida de información valiosa, ya que investigaciones recientes han logrado demostrar como la integración de la RA con herramientas de aprendizaje basadas en análisis de datos tendría la capacidad de aportar una alternativa de evaluación de operarios más efectiva en entornos industriales (Barta et al., 2024; Moreira et al., 2024).

El presente estudio busca contribuir a la reducción de esta brecha investigativa mediante el análisis del impacto generado por la aplicación de RA en la capacitación de nuevos operarios para el proceso de ensamblaje de bicicletas, así como la optimización de dicho proceso de ensamblaje, cuantificando su efectividad mediante la aplicación de un sistema estructurado de medición y evaluación. Para ello es necesario realizar un levantamiento apropiado del proceso, mismo que al ser evaluado en función a un estudio de tiempos permite establecer apropiadamente los KPI's correspondientes, después de lo cual se procede a la generación de una app de RA que aporte una retroalimentación efectiva para el proceso de capacitación.

Caso De Estudio

Identificación del Proceso

Dentro de una Institución de Educación Superior ubicada en Ecuador, se ha identificado un problema de aprendizaje asociado al proceso de ensamblaje de bicicletas, correspondiente a la práctica de estudio del tiempo de la asignatura “Ingeniería de Métodos”. Durante su ejecución, se

ha evidenciado un retraso considerable por parte de los estudiantes, lo que ha permitido diagnosticar deficiencias en la retención de los conocimientos impartidos durante la fase formativa previa. Ante esta situación, se ha realizado una identificación estructurada del proceso con el fin de delimitar sus componentes esenciales y facilitar su análisis integral. Esta identificación contempla elementos clave como misión, alcance, responsables, entradas, salidas y recursos necesarios, que se detallan sistemáticamente en la Tabla 1.

Tabla 1
Identificación del proceso de ensamblaje de bicicletas

MISIÓN DEL PROCESO		
Ensamblar bicicletas de manera eficiente y consistente, asegurando la calidad, precisión y seguridad en cada unidad ensamblada, con la finalidad cubrir las necesidades del cliente final, y cumplir con los estándares de la industria.		
ALCANCE DEL PROCESO		
INICIO DEL PROCESO	FINAL DEL PROCESO	
Colocar el estribo en el cuadro de la bicicleta.	Realizar revisión de frenos.	
RESPONSABLES DEL PROCESO	EQUIPO GESTOR DEL PROCESO	
Líder del proceso	Técnico de laboratorio	
	Estudiantes	
ELEMENTOS DEL PROCESO		
RECURSOS	ENTRADAS	SALIDAS
Humanos:	Bicicletas infantiles desarmadas.	Registro de prácticas.
Técnico de laboratorio	Guía de la práctica	Bicicleta ensamblada.
Estudiantes de octavo ciclo	Reservaciones autónomas de los estudiantes.	Datos recopilados.
Materiales:	Diagrama de flujo del proceso.	
Mesas de trabajo.		
Bicicletas infantiles.		
Juego de llaves fijas combinadas (8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 15mm, 5/8in)		
Llave inglesa de gran abertura.		
Juego de llaves Allen (hexagonales).		
Destornillador plano.		
Destornillador estrella.		
Alicate.		
Tuercas varias		
Pernos varios		
PROVEEDORES	CLIENTES	
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y aplicadas.	Estudiantes	

Levantamiento del Proceso

Con base a las tareas establecidas para el proceso de ensamblaje, así como los datos previamente especificados, se realizó el levantamiento del proceso, expuesto tabla 2, en donde se observan las actividades a llevar a cabo de manera estructurada para el montaje exitoso de una bicicleta. En la misma se detallan paso a paso las instrucciones de ensamblaje, ajuste, inspección y transporte de cada una de las etapas, viéndose inmersos los subprocesos pertenecientes a las mismas.

Tabla 2

Actividades del proceso de ensamblaje de bicicletas

1	Colocar el estribo frontal
2	¿El estribo gira con libertad?
3	¿El estribo está muy suelto?
4	Colocar el soporte superior de la canastilla
5	Desplazar cable de freno posterior (Largo)
6	Colocar el cable posterior en el manillar y tambor de frenado externo
7	Desplazar cable de freno frontal (Corto)
8	Colocar el cable frontal el manillar y caliper de freno
9	Colocar el manubrio
10	Colocar manillares de freno en el manubrio
11	Trasladar a la estación de llanta frontal
12	Colocar caliper y guardalodo frontal
13	Ensamblar la llanta frontal
13.1	<i>Colocar tuerca delgada a cada lado del eje de la llanta frontal y ajustar</i>
13.2	¿La llanta gira libremente?
13.3	¿Las tuercas se aflojan con el giro?
14	Incorporar llanta frontal
14.1	<i>Colocar la llanta delantera en el estribo delantero</i>
14.2	<i>Colocar tuerca gruesa a cada lado del eje de la llanta frontal por fuera del estribo y ajustar</i>
14.3	¿La llanta gira libremente?
14.4	¿La llanta rosa con el guardalodo?
14.5	¿La llanta rosa con los frenos?
15	Trasladar a la estación de tren posterior
16	Colocar el sillín
17	Colocar guardalodo posterior
18	Ensamblar llanta posterior
18.1	<i>Colocar tuerca delgada a cada lado del eje de la llanta posterior y ajustar</i>
18.2	¿La llanta gira libremente?
18.3	¿Las tuercas se aflojan con el giro?
18.4	<i>Colocar tambor de frenado interno</i>
18.5	<i>Colocar tambor de frenado externo</i>
18.6	<i>Colocar tuerca delgada por fuera del tambor externo del freno y ajustar</i>
18.7	¿La llanta gira libremente?
18.8	¿La llanta se encuentra frenada?
18.9	¿El cable de freno se encuentra demasiado tenso?

19	Incorporar llanta posterior
19.1	Colocar la llanta en el estribo posterior
19.2	Colocar tuerca gruesa a cada lado del eje de la llanta posterior por fuera del estribo y ajustar
19.3	¿La llanta gira libremente?
19.4	¿La llanta rosa con algo?
20	Colocar cadena
20.1	Aflojar y retirar tuercas externas (Gruesas)
20.2	Retirar llanta posterior del estribo
20.3	Colocar la cadena en la catalina y el piñón
20.4	Colocar llanta nuevamente en el estribo
20.5	Colocar tuerca gruesa a cada lado del eje de la llanta posterior por fuera del estribo y ajustar
20.6	¿Al pedalear la cadena se suelta o se afloja?
21	Trasladar a estación de etapa final
22	Colocar el protector de cadena
23	Colocar pedales
24	Aflojar y retirar tuercas externas (Gruesas)
25	Incorporar ruedas de asistencia
25.1	Amar ruedas de asistencia
25.2	Colocar ruedas de asistencia con sus respectivas pletinas en el eje de la llanta posterior
25.3	Colocar tuerca gruesa a cada lado del eje de la llanta posterior por fuera de las llantas de asistencia
25.4	¿Las llantas posterior y de asistencia, mantienen el mismo contacto con el suelo?
26	Colocar la canastilla
27	Colocar soporte inferior de canastilla
28	Realizar revisión de frenos
28.1	¿Los frenos funcionan adecuadamente?
28.2	¿Cuál de los frenos no funciona adecuadamente?

Con la finalidad de evaluar de manera propicia la eficiencia de la metodología aplicada a la capacitación operativa, se han establecido dos indicadores específicos que permitirán tener una mejor comprensión del estado actual del proceso de ensamblaje, siendo estos: i) el tiempo de ciclo por bicicleta, y ii) número de errores por bicicleta.

Evaluación del tiempo de capacitación actual

El proceso de capacitación se limita a una explicación detallada de como ensamblar una bicicleta, la misma es dictada por el técnico capacitador a medida que ensambla la bicicleta, los operarios a capacitar cuentan únicamente con un cursograma analítico que no responde a todas las inquietudes que pudiesen surgir durante el proceso. El tiempo cronometrado de la capacitación bajo esta metodología fue de 1 hora con 2 minutos y 55 segundos, transformando a esta en una actividad monótona y tediosa durante el proceso de aprendizaje.

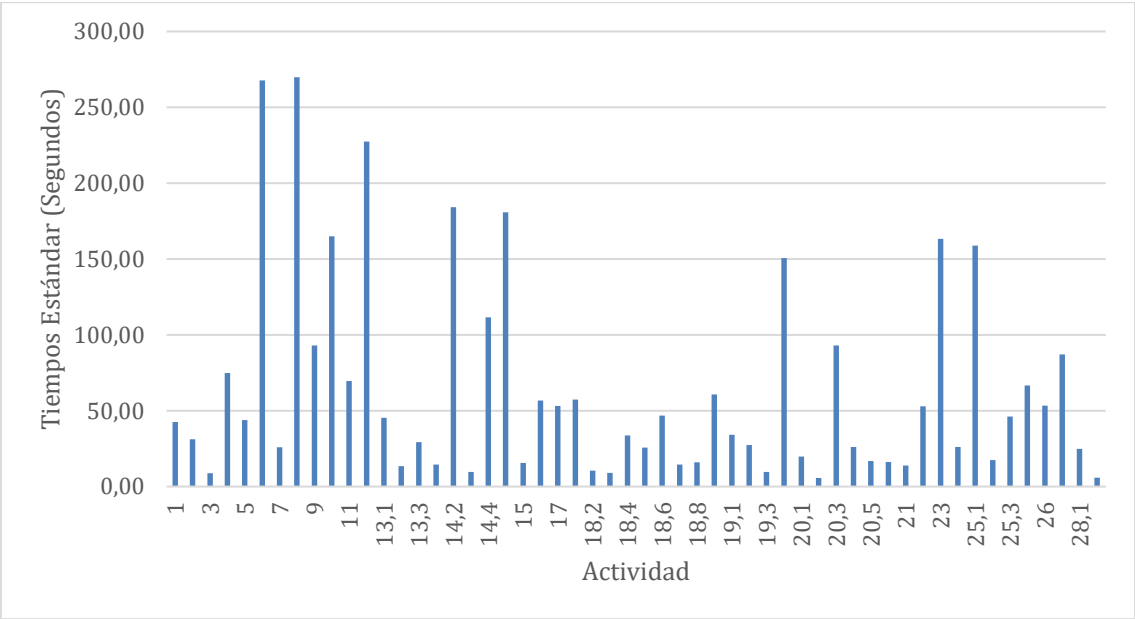
Evaluación del tiempo y errores del proceso convencional

El estudio de tiempos se realizó mediante la metodología Westinghouse en conjunto con la metodología General Electric, tomando como grupo de control a siete operarios recién

capacitados, seleccionados aleatoriamente en cada una de las cuatro estaciones, para evitar sesgos generados por la curva de aprendizaje de un mismo operario se seleccionaron cinco operarios distintos, siendo esta una muestra significativa, y se registró una observación del tiempo de ensamblaje por cada uno. A pesar que las cinco observaciones arrojaron un tiempo promedio de 43 minutos con 45 segundos, lo cual, en base al criterio General Electric determina un número de observaciones igual a tres, con el propósito de mejorar la fiabilidad de datos se decidió mantener los datos de las cinco observaciones, exponiéndose dentro de la figura 1 los resultados de los tiempos estándar, en donde a su vez se evidencia un tiempo estándar general de 57,07 minutos.

Figura 1

Tiempos estándar y errores por actividad mediante el método convencional



Así también, se logra evidenciar un total de 43 errores dentro del estudio, lo cual, en base a la formula expuesta en el indicador 2, da como resultado un total de 7,17 errores por unidad, valor que refleja un alto índice de fallos, denotando una inversión adicional de recursos en los diferentes reprocesos.

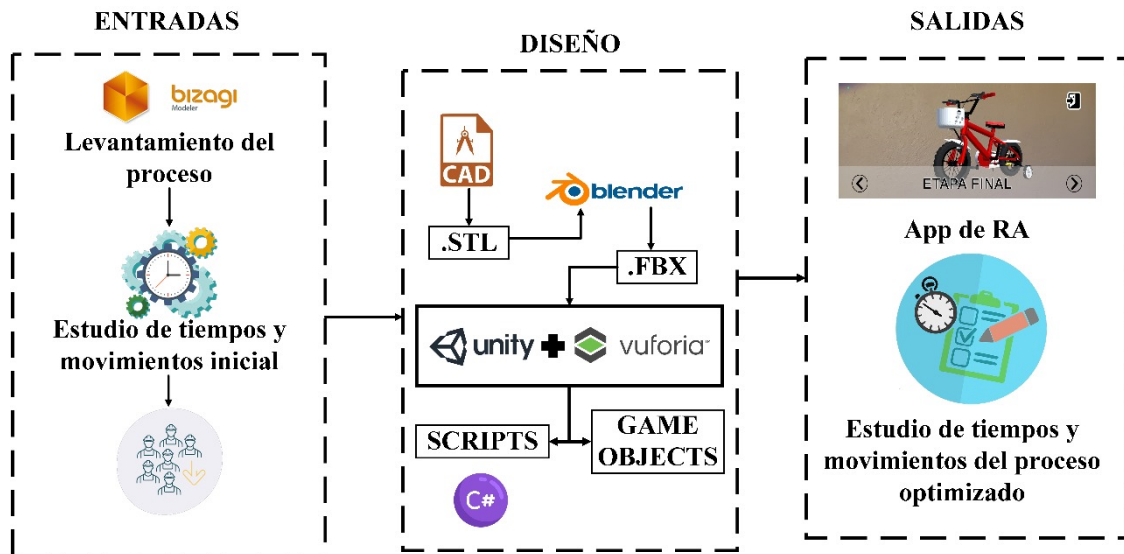
METODOLOGÍA

Diseño y construcción de la app de RA

Con los datos expuestos en los indicadores, se define el concepto que mantendrá la app de RA para el proceso, el presente caso de estudio plantea una guía didáctica que complemente el proceso de capacitación con un adecuado contenido multimedia, de manera inmersiva e interactiva.

Figura 2

Arquitectura de la aplicación de RA



Como se observa en la arquitectura de la app, expuesta en la figura 2, el diseño y construcción del aplicativo da inicio con la etapa de modelado, en donde mediante un software CAD, se procede a generar un modelo tridimensional de cada una de las piezas en una escala 1:1, posterior a ello se exporta el archivo con la extensión .stl, el cual mediante el empleo del software Blender en su versión 4.3, permitirá afinar detalles gracias a la compatibilidad de este tipo de archivos con el software mencionado, una vez conforme con el objeto 3D, se exporta el archivo con la extensión .fbx, lo que permitirá integrarlo a la plataforma de Unity.

La etapa de construcción de la app tiene su punto de partida en la integración de Unity con Vuforia, esta integración es la que otorga a Unity la capacidad de generar aplicativos de RA, mediante el empleo de diferentes herramientas como AR camera, canvas, panel, Game Object, y distintos scripts, se diseñan el número de pantallas y escenas pertinentes para la app, en las mismas se expone de manera detallada la actividad a realizar, en conjunto con un visual que permite identificar el objeto al que hace referencia la instrucción, así como la metodología que se empleará para su integración a la bicicleta. Los componentes que forman parte del aplicativo, así como la relación de dependencia que los entrelaza, se puede describir como: i) Teléfono Android la plataforma física desde la cual se ejecuta la aplicación, por lo que mantiene una conexión directa con el ii) Sistema de RA, el cual actúa como un núcleo central, gestionando la interacción con el usuario. El iii) Módulo introductorio le da la bienvenida al usuario, proporcionando un breve contexto referente a la RA. Por otro lado, el iv) Módulo de interacción permite al usuario navegar por las instrucciones, interactuando con los componentes propuestos, esto a través de las cuatro etapas del proceso.

La app consta de 75 pantallas expuestas de manera secuencial, detalladamente distribuidas con la finalidad que la experiencia del usuario sea lo más didáctica y amigable

posible. Al inicializarse el aplicativo, se despliega un mensaje de bienvenida que comparte pantalla con dos botones, i) Start, el cual inicializa el proceso de capacitación al redireccionar al índice del aplicativo, y ii) Introducción, el cual, genera un cambio de pantalla hacia un breve proceso introductorio compuesto por dos videos de corta duración, donde uno de ellos relata un proceso estándar de ensamblaje de bicicletas, mientras que el siguiente plantea un escenario en donde la aplicación de la RA aporta beneficios realmente significativos dentro de un proceso, este módulo introductorio genera un primer acercamiento del usuario hacia esta tecnología, captando la atención e interés del mismo.

En la Figura 3 se ilustra el módulo de interacción, el cual estructura el proceso de ensamblaje en cuatro etapas principales: i) Frenos, ii) Llanta Frontal, iii) Tren Posterior y iv) Etapa Final. La subfigura 3a muestra la organización general de estas etapas dentro del sistema, permitiendo visualizar la progresión del usuario a lo largo del proceso de capacitación. Cada una de estas secciones está diseñada para abordar de manera específica cada componente crítico del ensamblaje, asegurando que el usuario reciba instrucciones detalladas antes de proceder a la siguiente fase.

Cada etapa cuenta con una portada distintiva, como se evidencia en la subfigura 3b, lo que permite su fácil identificación dentro del módulo de interacción. Estas portadas presentan información visual clara y estructurada, lo que facilita la navegación dentro del entorno de realidad aumentada. Adicionalmente, cada una de estas secciones contiene una combinación de elementos gráficos, texto descriptivo e indicaciones interactivas, proporcionando un contexto informativo que guía al usuario a lo largo del proceso de ensamblaje.

Las subfiguras 3c y 3d evidencian la integración de cuestionamientos, indicaciones y objetos tridimensionales, los cuales cumplen un papel fundamental en la comprensión de las tareas a realizar. Estos elementos interactivos fomentan un análisis crítico por parte del usuario, ya que cada indicación o pregunta debe ser resuelta antes de avanzar a la siguiente pantalla. De esta manera, se garantiza una experiencia de aprendizaje estructurada, en la que el usuario no solo sigue instrucciones, sino que también reflexiona sobre las acciones a ejecutar dentro del entorno de capacitación en realidad aumentada.

El proceso se da por culminando una vez se hayan completado las instrucciones de ensamblaje, exponiendo el cumplimiento de las mismas con un mensaje de cierre observable en la subfigura 3e.

Figura 3

Conjunto de pantallas pertenecientes a la app de RA



(a) Índice del sistema



(b) Portada de la estación "Tren Posterior"



(c) Instrucción de ensamblaje



(d) Cuestionamiento para validación



(e) Pantalla de finalización del proceso

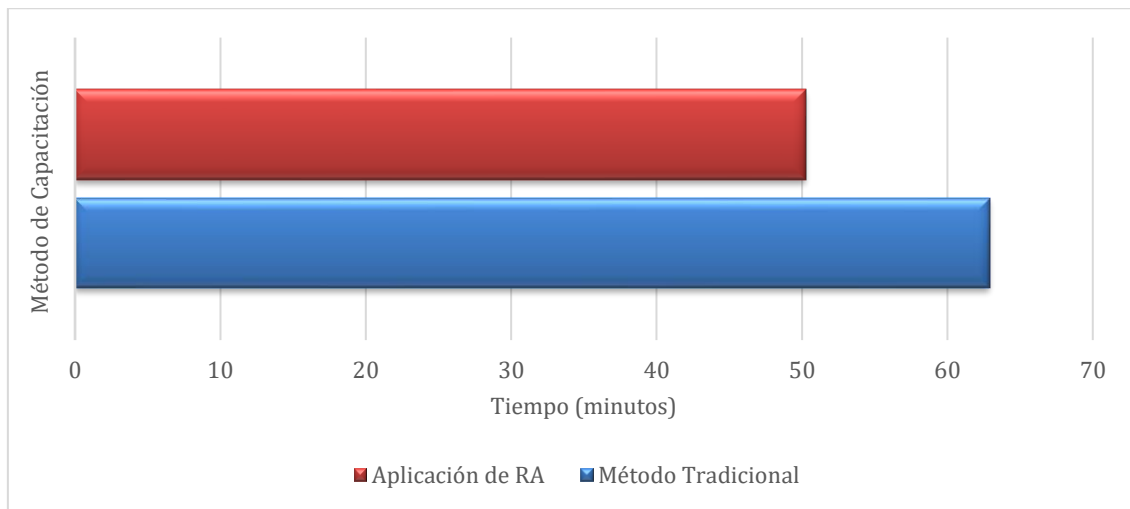
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del tiempo de capacitación propuesto

El proceso de capacitación optimizado converge la experiencia del técnico capacitador y el empleo de materiales visuales interactivos en una experiencia inmersiva, facilitando así la asimilación del proceso, esto se valida en función a la reducción de tiempo de capacitación, siendo el tiempo empleado mediante la aplicación de RA de 50 minutos y 26 segundos, disminuyendo así el tiempo de capacitación en un 19,84 % como se logra evidenciar en la figura 4.

Figura 4

Comparativa del tiempo de capacitación entre el método tradicional y la aplicación de RA

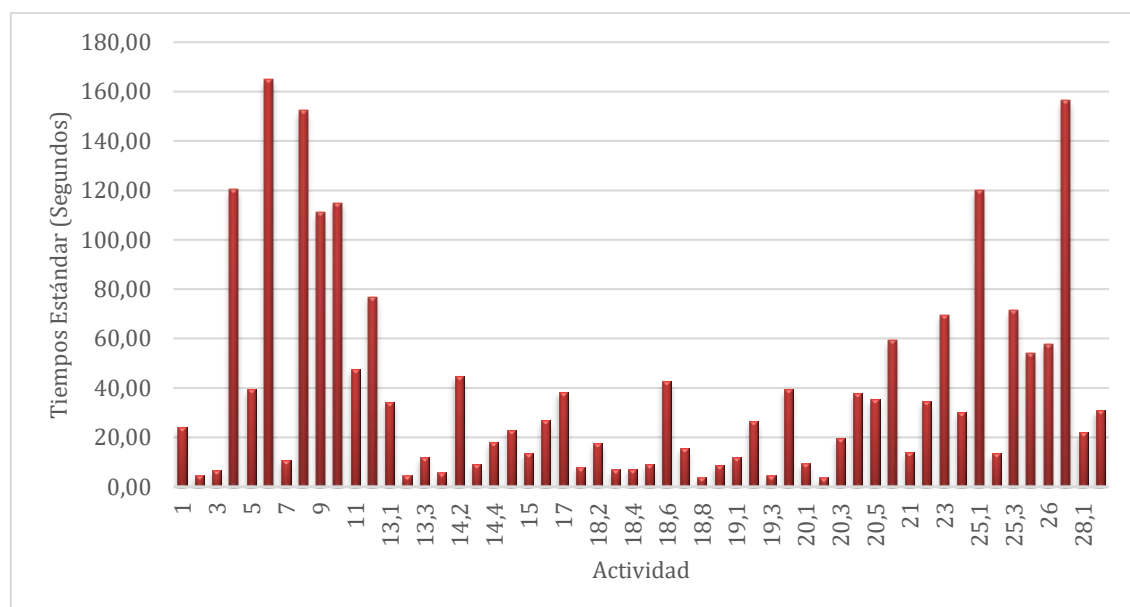


Evaluación del tiempo y errores del proceso aplicando RA

Para la evaluación del proceso empleando la app de RA, se establece un grupo experimental idéntico al grupo de control con el objetivo de mantener simetría para la comparativa, la evaluación se realiza bajo el mismo enfoque inicial, obteniéndose un tiempo promedio del proceso de 28 minutos y 58 segundos, lo cual en base al criterio General Electric indica un número de observaciones igual a cinco, dentro de la figura 5 se exponen los tiempos estándar obtenidos, mostrándose como tiempo estándar general un total de 35,72 minutos.

Figura 5

Tiempos estándar y errores por actividad con la aplicación de RA



Mediante una comparativa entre los resultados del método convencional y la aplicación de RA, se ha logrado evidenciar una reducción del 37,41% del tiempo del proceso, demostrándose

así el impacto que genera la introducción de nuevas tecnologías dentro de los distintos procesos, siendo en este caso puntual la aplicación de RA para el ensamblaje de bicicletas.

Así también se constató una reducción en el índice de errores, evidenciándose un total de 22 errores en las 5 observaciones, lo que en base al indicador 2, establece un total de 4.40 errores por unidad, disminuyendo el índice de errores del proceso en un 38,63%.

CONCLUSIONES

El presente estudio comparativo evaluó la eficacia de dos enfoques metodológicos aplicados a la formación en el proceso de montaje de bicicletas. Tomando como punto de partida el análisis de la metodología convencional basada en la observación directa y los materiales escritos, dando así lugar a la exploración de una alternativa innovadora mediante el uso de la Realidad Aumentada. La evidencia empírica obtenida sugiere que la incorporación de tecnologías inmersivas, como la RA, facilita la comprensión de las tareas operativas, aumenta la retención de conocimientos y optimiza tanto los tiempos de ejecución como la precisión del montaje, destacándose también el valor añadido de una interfaz interactiva, que fomenta la autonomía del usuario y mejora la experiencia formativa en entornos industriales.

A pesar que la implantación de la RA ha demostrado beneficios significativos, este estudio reconoce oportunidades de mejora que pueden abordarse en futuras investigaciones, tales como la optimización de los contenidos multimedia para mejorar la experiencia inmersiva, así como evaluar longitudinalmente su impacto en la curva de aprendizaje. En este sentido, para futuras investigaciones, se propone desarrollar un sistema de formación más dinámico e inteligente que integre mecanismos de análisis de datos para medir con mayor precisión la retención de conocimientos a lo largo del tiempo. Además, resulta preciso mencionar la factibilidad de una ampliación en la muestra de participantes, incorporando operadores con diferentes niveles de experiencia.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud a la red de investigación INTELIA, respaldada por la REDU, por su valiosa ayuda a lo largo de este trabajo. Adicionalmente, se agradece a la Universidad Técnica de Cotopaxi por su apoyo en los procesos de investigación.

REFERENCIAS

- Aburayya, A. (2024). *Analysing the Influence of Augmented Reality on Organization Performance via Supply and Logistics Value Chain Functions: A Hybrid ANN-PLS Model Assessment in the Gulf Cooperation Council Region*. *Logistics*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/logistics8040110>
- Barta, S., Gurrea, R., & Flavián, C. (2024). *Augmented reality experiences: Consumer-centered augmented reality framework and research agenda*. *Psychology and Marketing*. <https://doi.org/10.1002/mar.22143>
- Garcia, C., Ortega, M., Ivorra, E., Contero, M., Mora, P., & Alcañiz, M. L. (2024). *Holorailway: an augmented reality system to support assembly operations in the railway industry*. *Advances in Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40436-023-00479-5>
- Guaña-Moya, J., Arteaga-Alcívar, Y., Criollo-C, S., & Cajamarca-Carrazco, D. (2024). *Use of Interactive Technologies to Increase Motivation in University Online Courses*. In *Education Sciences* (Vol. 14, Issue 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/educsci14121406>
- Hou, X. (2024). *The Application of Virtual Reality and Augmented Reality in Mechatronics Education Reform*. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 391, 1005–1012. <https://doi.org/10.3233/FAIA241199>
- Hung, Y. Y., Chu, W. Y., Jiang, J., Yeung, W. Y., Yan, W. H., Kwok, T. O., & Chan, Y. K. (2025). *The interactive use of augmented reality for educating the elderly on common age-related eye disease*. *BMC Geriatrics*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05658-y>
- Ivaschenko, A., Khorina, A., & Sitnikov, P. (2018). *Accented visualization by augmented reality for smart manufacturing applications*. 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), 519–522. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390759>
- K. J*, D. S. R., & M. A. N, B. B. (2019). *An Augmented Reality-Based Simulation Guide for Apparel Assembly*. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(4), 3012–3018. <https://doi.org/10.35940/ijrte.D7510.118419>
- Khorrami Shad, H., Tak Wing Yiu, K., Lovreglio, R., & Feng, Z. (2024). *State-of-the-art analysis of the integration of augmented reality with construction technologies to improve construction safety*. *Smart and Sustainable Built Environment*, 13(6), 1434–1449. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2022-0151>
- Liu, X. W., Li, C. Y., Dang, S., Wang, W., Qu, J., Chen, T., & Wang, Q. L. (2022). *Research on Training Effectiveness of Professional Maintenance Personnel Based on Virtual Reality and Augmented Reality Technology*. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/su142114351>

- Morales Méndez, G., & del Cerro Velázquez, F. (2024). *Impact of Augmented Reality on Assistance and Training in Industry 4.0: Qualitative Evaluation and Meta-Analysis*. Applied Sciences (Switzerland), 14(11). <https://doi.org/10.3390/app14114564>
- Moreira, L. C. de S., Rebello, C. M., Costa, E. A., Sánchez, A. S., Ribeiro, L. S., & Nogueira, I. B. R. (2024). *Digital Transformation in the Chemical Industry: The Potential of Augmented Reality and Digital Twin*. In Applied Sciences (Switzerland) (Vol. 14, Issue 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app142411607>
- Nelson, S., Darni, R., Haris, F., Ilham, I., Ndayisenga, J., Septri, S., Sari, D. N., Ockta, Y., Festiawan, R., Nelson, S., Darni, R., & Haris, F. (2025). *The effectiveness of learning media based on digital augmented reality (AR) technology on the learning outcomes of martial arts*. 63, 878–885. <https://doi.org/10.47197>
- Rumokoy, F. S., & Frank, B. (2025). *Retail value creation through augmented reality: The role of task-technology fit, consumer knowledge, and personality*. Journal of Retailing and Consumer Services, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.104173>
- Sakr, A., & Abdullah, T. (2024). *Virtual, augmented reality and learning analytics Impact on learners, and educators: A systematic review*. Education and Information Technologies. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12602-5>
- Stavropoulou, A., Chu, Y., Connolly, M., Brereton, S., Evgenikos, K., Bonacaro, A., Guasconi, M., La Malfa, E., Esposito, S. M. R., Bignami, E. G., Troussas, C., Mylonas, P., Papakostas, C., Krouska, A., Voyiatzis, I., Sgouropoulou, C., Strousopoulos, P., Stokes, D., Kyriakidi, D., ... Timmins, F. (2025). *Augmented reality in intensive care nursing education: A scoping review*. In Nurse Education in Practice (Vol. 83). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nepr.2025.104263>
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., & Gustavsson, P. (2017). *Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory: Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products*. In IEEE Access (Vol. 5, pp. 9118–9130). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2703952>
- Wang, J., Chang, C.-C., Duan, J., Fox, D., & Krishna, R. (2024). *EVE: Enabling Anyone to Train Robots using Augmented Reality*. <https://doi.org/10.1145/3654777.3676413>
- Xue, Z., Yang, J., Chen, R., He, Q., Li, Q., & Mei, X. (2024). *AR-Assisted Guidance for Assembly and Maintenance of Avionics Equipment*. Applied Sciences (Switzerland), 14(3). <https://doi.org/10.3390/app14031137>