

07-003

### **EVALUATION OF THE USER EXPERIENCE OF AN INDUSTRIAL ROBOTIC ENVIRONMENT IN VIRTUAL REALITY**

Apraiz Iriarte, Ainhoa (1); Lasa Erle, Ganix (1); Serrano Muñoz, Antonio (1); Elguea Aguinaco, Íñigo (1); Arana Arexolaleiba, Nestor (1)

(1) Mondragon Unibertsitatea

Industry 4.0 is leading to a whole new level of process automation, thus redefining the role of humans, and altering existing jobs in yet unknown ways. Although the number of robots in the manufacturing industry has been steadily increasing for several decades, the current growth trend is remarkable given the number and variety of industries using robots. Operators need to have positive and fit-for-purpose experiences through trust-based, smooth, safe, and satisfying interaction to integrate robots as a natural part of their daily lives. In this sense, virtual reality is presented as an optimal technology to evaluate this interaction while ensuring safe conditions, but the impact it has on human factors still has unknowns to be solved. This research paper presents an evaluation study of the human factors resulting from collaboration with an industrial robot in a virtual environment taking into account the gender perspective. For this purpose, the behaviour of the users (n=8) has been analysed and the interaction has been evaluated by means of two questionnaires to correlate task performance and subjective perception.

Keywords: Human-Robot Interaction (HRI); Virtual Reality (VR); User eXperience (UX); Human Factors; Interaction

### **EVALUACIÓN DE LA EXPERIENCIA DE USO DE UN ENTORNO ROBÓTICO INDUSTRIAL EN REALIDAD VIRTUAL**

La Industria 4.0 está conduciendo a un nivel completamente nuevo de automatización de procesos, redefiniendo así el papel de las personas y alterando los puestos de trabajo existentes en formatos aún desconocidos. Aunque el número de robots en la industria manufacturera no ha dejado de aumentar desde hace varias décadas, la tendencia actual de crecimiento es notable dado el número y la variedad de industrias que utilizan robots. Los operarios deben tener experiencias positivas y adecuadas a su propósito mediante una interacción basada en la confianza, fluida, segura y satisfactoria para integrar los robots como parte natural de su cotidianidad. En este sentido, la realidad virtual se presenta como una tecnología óptima para evaluar esta interacción garantizando condiciones de seguridad, pero el impacto que tiene en los factores humanos todavía tiene incógnitas por resolver. Este trabajo de investigación presenta un estudio de evaluación de los factores humanos resultantes de la colaboración con un robot industrial en un entorno virtual teniendo en cuenta la perspectiva de género. Para ello, se ha analizado el comportamiento de los usuarios (n=8) y se ha evaluado la interacción mediante dos cuestionarios para correlacionar el rendimiento de la tarea y la percepción subjetiva.

Palabras clave: Interacción Persona-Robot (HRI); Realidad Virtual (RV); eXperiencia de Usuario (UX); Factores Humanos; Interacción

Correspondencia: [aapraizi@mondragon.edu](mailto:aapraizi@mondragon.edu)

Agradecimientos: Los autores queremos agradecer el apoyo del Centro de Innovación de Diseño (DBZ) de Mondragon Unibertsitatea y a la Escuela Politécnica Superior de Mondragón.



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

La Industria 4.0 está dirigiendo a un nivel completamente nuevo la automatización de los procesos, redefiniendo así el papel de las personas y alterando los actuales puestos de trabajo hacia formatos aún desconocidos (Waschull et al., 2020). Aunque el número de robots en la industria manufacturera ha aumentado de forma constante durante varias décadas, la tendencia actual de crecimiento es notable dado el número y la variedad de industrias que utilizan robots. En las fábricas modernas, las personas y los robots suelen coexistir en un espacio común, en el que los robots complementan las capacidades del operario, mientras que los humanos se encargan de las tareas más delicadas (por ejemplo, las tareas de alta precisión, la comprobación visual de la calidad, la toma de decisiones o el control estratégico del proceso) (Matheson et al., 2019).

Para que los robots se conviertan en aliados en el día a día de los operadores es necesario que obtengan experiencias positivas a la vez de adecuadas de acuerdo con su propósito mediante una interacción fluida y satisfactoria (Boden et al., 2017; Chen et al., 2020; Kahn Jr et al., 2007; Lindblom & Alenljung, 2020). Esto significa que los humanos deben experimentar que un robot cumple con los objetivos explícitos e implícitos existentes, lo que significa que actúa de manera eficiente y que consiga que las personas sientan confianza, seguridad y comodidad mientras conviven (Benyon, 2019).

La Realidad Virtual (RV) es una herramienta eficaz y capaz de simular sistemas robóticos industriales con un alto nivel de inmersión (Gammieri et al., 2017). Prati et al. (2021) presentan un enfoque integrado para el diseño de espacios de trabajo colaborativos industriales. En particular, presentan cómo utilizar las tecnologías de RV para ayudar a los diseñadores a crear prototipos de espacios de trabajo interactivos para su validación temprana. Destacan que la RV permite a los diseñadores considerar y evaluar por adelantado la experiencia general del usuario, adoptando una perspectiva centrada en las personas. El enfoque que proponen se basa en dos niveles: el primero permite a los diseñadores generar y organizar automáticamente partiendo de una descripción conceptual de sus funcionalidades y de las herramientas necesarias; el segundo tiene como objetivo apoyar a los diseñadores durante el diseño de las interfaces mediante el mapeo de la interacción, la creación de prototipos y la realización de pruebas en RV.

Los principales ejemplos de aplicación de soluciones de RV en contextos de interacción persona-robot (HRI, por sus siglas en inglés, Human-Robot Interaction) se refieren a la simulación del futuro entorno de trabajo, antes de su realización, con el fin de validar las soluciones previstas frente a los requisitos iniciales (de Giorgio et al., 2017) o el apoyo al diseño de tareas cooperativas, desde la definición de movimientos hasta la distribución de tareas (Gammieri et al., 2017; Matsas et al., 2016; Q. Wang et al., 2019). Tal y como indican Prati et al., (2021), a pesar de haber varios estudios en áreas de aplicación como ensamblaje colaborativo, soldadura, manipulación y entrenamiento, solo unos pocos estudios se han centrado en la perspectiva centrada en el usuario.

Según Maurice et al. (2017), es necesario seguir investigando en entornos industriales para validar la implementación de la HRI. Por lo tanto, es esencial desarrollar métodos de evaluación específicos y detallados para optimizar el diseño de estos puestos de trabajo con robótica colaborativa (Colim et al., 2020, 2021; Gualtieri et al., 2020; Maurice et al., 2017), teniendo en cuenta las condiciones industriales, las características de los trabajadores y los cobots, así como el nivel de interacción colaborativa (Khalid et al., 2017). En este sentido, la industria robótica está creciendo a un nivel en el que las personas y los robots serán capaces de colaborar (Harriott et al., 2013). Sin embargo, aún no existe un modelo universal que evalúe el efecto que este hecho tiene en el rendimiento de las personas y contemple la perspectiva de género como variable de investigación (Harriott et al., 2013). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la experiencia de usuario a la hora de interactuar con un brazo

robótico en un entorno virtual teniendo en cuenta la perspectiva de género. Se utilizará, por lo tanto, una muestra igualitaria y se desagregarán los resultados obtenidos por género para observar si existen diferencias significativas durante la interacción.

## **2. La Experiencia de Usuario (UX) en la interacción persona-robot (HRI)**

La norma ISO 9241-210 (2019) define la Experiencia de Usuario (UX) como "las percepciones y respuestas de una persona que resultan del uso o el uso anticipado de un producto, sistema o servicio", incluidas las emociones, creencias, preferencias, percepciones, respuestas físicas y psicológicas, comportamientos y logros de los usuarios que se producen antes, durante y después del uso. La UX es un factor clave en la calidad de un producto o servicio (Schrepp et al., 2014; Vermeeren et al., 2010; Wallach et al., 2017), y un elemento esencial para el estudio de la misma es su evaluación, que se refiere a la aplicación de un conjunto de métodos e instrumentos cuyo objetivo es determinar la percepción sobre el uso de un sistema o producto, permitiendo identificar aspectos a mejorar o a mantener en el objeto a estudiar (Díaz-Oreiro et al., 2019).

Dautenhahn (2013) define la HRI como "la ciencia que estudia el comportamiento y las actitudes de las personas hacia los robots en relación con las características físicas, tecnológicas e interactivas de los mismos, con el objetivo de desarrollar robots que faciliten la generación de interacciones humano-robot que sean al mismo tiempo sean eficientes (de acuerdo con los requisitos originales de su área de uso prevista), aceptables para las personas, que satisfagan las necesidades sociales y emocionales de sus usuarios individuales, y que respeten los valores humanos".

Prati et al. (2021) destacan que un aspecto clave para el éxito de la HRI es centrarse en la UX. En este contexto, la investigación sobre los robots sociales ha reconocido recientemente el papel del diseño de la UX para garantizar una interacción positiva. En efecto, una experiencia negativa podría impedir aprovechar las características de los robots o rechazar la interacción con ellos. Según Prati et al. (2021) solo el estudio preciso de la UX desde la fase inicial del diseño puede garantizar una interacción persona-robot aceptable y agradable, capaz de mejorar también la eficiencia y la eficacia de la interacción. Considerar la forma en que el operario interactúa con el robot y entender su UX es difícil, especialmente en el sector industrial. Para ello, es conveniente adoptar un enfoque estructurado centrado en las personas para ayudar a los diseñadores a resolver las cuestiones técnicas teniendo en cuenta las necesidades y capacidades del usuario, utilizando técnicas basadas en la UX. Prati et al. (2021) proponen un método estructurado orientado a la UX para investigar el diálogo persona-robot. Tiene como objetivo introducir un conjunto de técnicas de UX para apoyar el diseño de las interfaces. De acuerdo con el enfoque de Diseño Centrado en las Personas (DCP), pone al usuario en el centro. Se trata de un proceso iterativo. Por lo tanto, el primer paso del método consiste en la recopilación de requisitos: equipo multidisciplinar, análisis de usuario (para el que propone las herramientas User/Task Matrix y Experience Maps), análisis de la actividad y visualización de la interacción. El segundo paso, consiste en el diseño de la interfaz, posterior prototipo y finalmente la evaluación de la UX, para el que proponen realizar tests de usuario, pero no indican ningún proceso, técnica o herramienta para llevar a cabo la evaluación. El marco propuesto por Prati, Peruzzini, et al. (2021), denominado ciclo UX en HRI, es el planteamiento más cercano, sin embargo, muestra carencias en la fase de evaluación.

### 3. Metodología

Tal y como proponen Mazmela Echave et al. (2020), se ha utilizado un enfoque multimétodo y holístico, considerando datos de diversa naturaleza, valores pragmáticos y valores de percepción.

#### 3.1 Aspectos evaluados

Se han evaluado por un lado **aspectos pragmáticos**: i) tiempo de ejecución de la tarea y ii) el índice de producción. Estos indicadores objetivos sirven para dotar la evaluación de una visión objetiva sobre la ejecución de la tarea. Durante la experimentación, el evaluador experto recogerá las acciones realizadas por el usuario en cada una de las tareas y medirá el tiempo de ejecución.

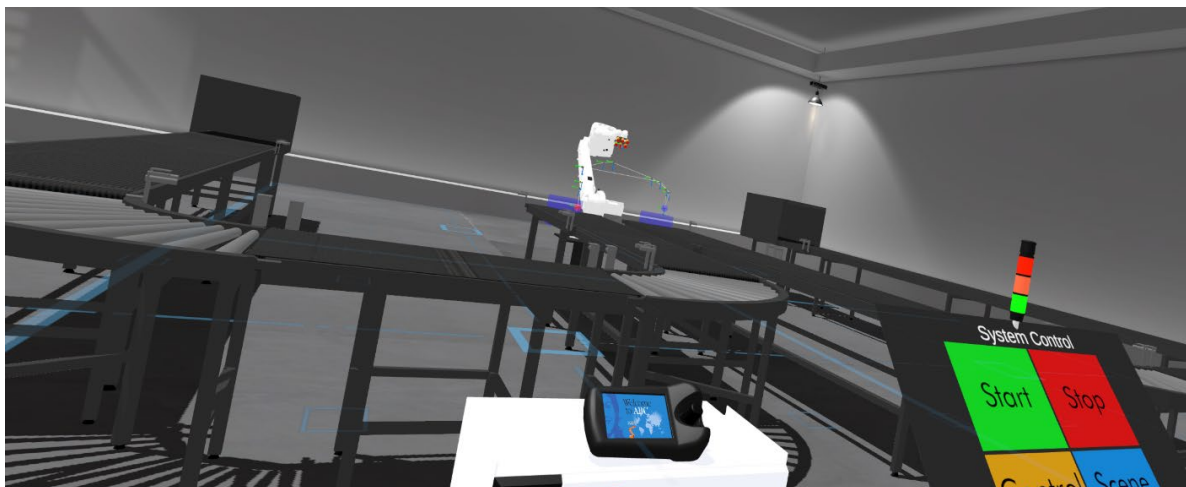
Finalmente, se han recogido **valores de percepción de usuario**. Para ello se han utilizado dos cuestionarios: i) el cuestionario SE-HRI propuesto por von der Pütten y Bock (2018), que evalúa la percepción de autoeficacia con respecto al HRI y se compone de 18 ítems que los participantes han de valorar en una escala de Likert de 6 puntos; y, ii) el cuestionario para medir la UX en entornos inmersivos de VR propuesto por Tcha-Tokey et al. (2016), que se compone de 72 ítems que los participantes han de evaluar en una escala de Likert de 7 puntos. Estos 72 ítems se clasifican en los siguientes sub-constructos: presencia, engagement, inmersión, fluidez, destreza, emociones, consecuencia de la experiencia, juicio y adopción tecnológica.

#### 3.2 Espacio y dispositivos utilizados

La experimentación se ha llevado a cabo en un laboratorio diseñado para ejecutar testeos de usabilidad con RV. Este laboratorio dispone de las gafas de RV Vive Pro de HTC (*VIVE Pro Full Kit | VIVE European Union*, n.d.). Las gafas cuentan con un seguimiento de precisión a escala de la habitación, colores vibrantes en la pantalla, contraste alto y sonidos realistas. Están diseñadas para la RV de nivel profesional.

Se ha utilizado el software VR Robotics Simulator Steam (MindRend Technologies, 2020). Concretamente, se ha utilizado una Process Demo propuesta en el propio software, "Material Handling Demo: Conveyor Pick & Place". El entorno está compuesto de un brazo robótico, 4 líneas de montaje y una pantalla para accionar el robot (Figura 1).

**Figura 1: Entorno virtual utilizado. Material Handling Demo: Conveyor Pick & Place** (MindRend Technologies, 2020).



### 3.3 Procedimiento metodológico

En la **fase previa** los participantes han rellenado un consentimiento y un cuestionario sociodemográfico, donde además de la edad y el sexo, han indicado si tienen experiencia con RV o con robots y, más concretamente, qué tipo de robot (doméstico o industrial), cuántas veces los han usado, con qué frecuencia, etc.

A continuación, en la **fase durante**, los participantes se han colocado los dispositivos de RV, y se les ha explicado cómo funcionan los mandos y las funciones que pueden hacer con cada uno de los botones. Luego, se ha procedido al test en sí, donde se les ha pedido que realicen una serie de tareas:

- T1: Familiarización con el entorno 4 minutos. Durante 4 minutos, los participantes podían interactuar libremente con el entorno.
- T2: Recoger 7 cajas de la línea de montaje y colocarlos en el suelo.
- T3: Cambiar la velocidad del robot de 4 m/s a 10 m/s.
- T4: Recoger de nuevo 7 cajas de la línea de montaje y colocarlos en el suelo.

En las tareas 2 y 4, se les ha dejado un máximo de 5 minutos para realizar. Si pasado este tiempo no conseguían realizarlo, se ha cortado la tarea. Durante la ejecución de las tareas se han recogido los indicadores de desempeño: i) tiempo de realización de tareas y en las tareas 2 y 4 ii) el número de cajas recogidas. Estos indicadores objetivos sirven para dotar el de una visión objetiva sobre la ejecución de la tarea.

En la **fase posterior** a la interacción, los participantes han rellenado dos cuestionarios donde evalúan desde su percepción la interacción con el robot: i) SE-HRI (von der Pütten & Bock, 2018) y ii) el cuestionario de UX en RV (Tcha-Tokey et al., 2016).

### 3.4 Participantes

Han participado 8 personas, estudiantes de la universidad, de los cuales 4 eran mujeres y 4 hombres. La edad media de los participantes ha sido de 24 años (sd= 3,5). Mediante un cuestionario se han recogido datos sociodemográficos. Los datos obtenidos de este se muestran resumidos en la Tabla 1. De estos se destacan el uso de robots y de RV. Siendo así, se ha conocido que 4 de los participantes tienen experiencia con robots domésticos, 3 no tienen ninguna experiencia con ningún tipo de robot y una persona tiene experiencia con un brazo robótico. En cuanto a la RV, 4 de los participantes nunca la ha utilizado, 2 personas han tenido alguna toma de contacto y otras 2 lo han utilizado frecuentemente para jugar. Resulta interesante en este caso realizar el caso de estudio con una muestra homogénea (en cuanto a edad y formación) para poder poner el foco en si existen diferencias de género.

**Tabla 1: Datos sociodemográficos de los participantes.**

ID	Sexo	Edad	Experiencia con robots	Experiencia con RV
1	Hombre	21	Robot doméstico de cocina	Juegos en RV
2	Mujer	22	Robot aspirador doméstico	No
3	Hombre	25	Robot aspirador doméstico	Toma de contacto con algún juego
4	Mujer	22	Robot doméstico de cocina	No
5	Hombre	22	No	No
6	Mujer	23	No	Una vez para jugar
7	Mujer	25	Industrial en línea de montaje	No
8	Hombre	32	No	Juegos en RV

## 4. Resultados

### 4.1 Indicadores de desempeño

En la Tabla 2 se muestran los indicadores de desempeño obtenidos por participante en cada una de las tareas. Como se ha mencionado previamente, la T1 consiste en la familiarización con el entorno y los dispositivos de RV, por lo tanto, todos los participantes han tenido 4 minutos para ello.

La T2, consistía en recoger 7 cajas de la línea de montaje en el menor tiempo posible. El participante que menos tiempo ha necesitado han sido 49 segundos. Pasados 5 minutos, se cortaba la tarea y se ha recogido también cuántas cajas han recogido en esos 5 minutos. Tres participantes no han sido capaces de terminar esta tarea y uno de ellos ni siquiera ha sido capaz de recoger ninguna caja. Las tres personas que no han acabado la tarea eran mujeres.

La T3 consistía en cambiar las propiedades del robot, concretamente, la velocidad. En este caso todos han conseguido hacerlo puesto que la persona facilitadora les ha guiado. Aun así, se observan diferencias en los tiempos necesitados, siendo 37 segundos el más bajo y 4:21 minutos el más alto.

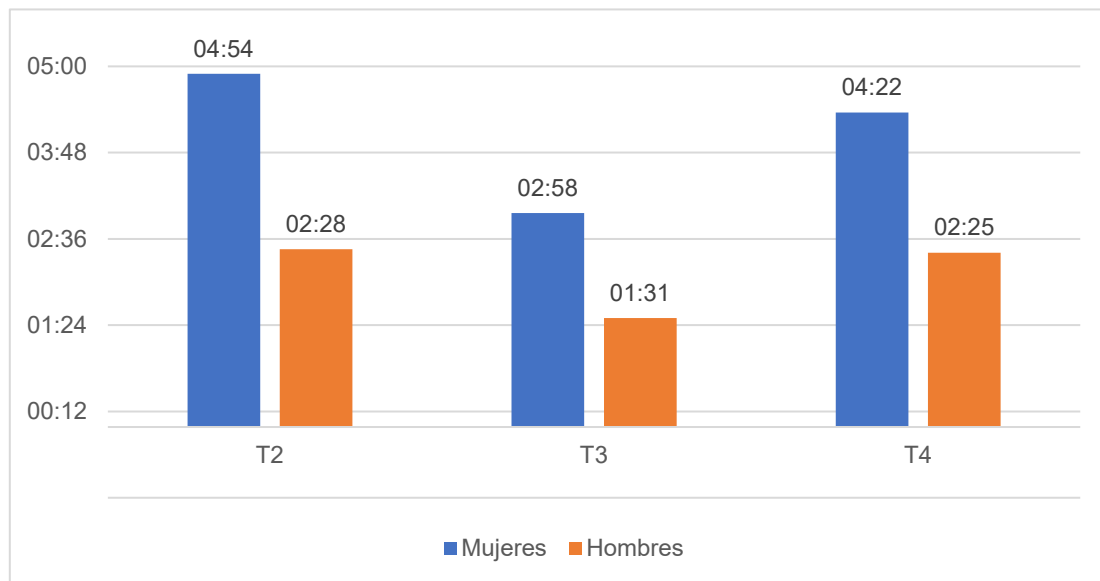
La T4 consistía en recoger de nuevo 7 cajas de la línea de montaje, sin embargo, esta vez circulaban más rápido. Siendo así, la persona que menos tiempo ha necesitado han sido 43 segundos. Cuatro personas no han sido capaces de acabar la tarea, y una persona no ha recogido ninguna caja. Entre las personas que sí han terminado la tarea, la que más tiempo ha necesitado han sido 2:45 minutos.

**Tabla 2: Indicadores de desempeño de los participantes por cada tarea.**

ID	T1	T2		T3		T4
	Tiempo (mm:ss)	Cajas recogidas	Tiempo (mm:ss)	Tiempo (mm:ss)	Cajas recogidas	Tiempo (mm:ss)
1	4:00	7/7	3:08	1:12	7/7	0:43
2	4:00	7/7	4:39	3:20	5/7	5:00
3	4:00	7/7	4:15	2:56	3/7	5:00
4	4:00	4/7	5:00	4:21	1/7	5:00
5	4:00	7/7	1:49	0:37	7/7	1:14
6	4:00	5/7	5:00	1:02	7/7	2:30
7	4:00	0/7	5:00	3:11	0/7	5:00
8	4:00	7/7	0:42	1:19	7/7	2:45

En la Figura 2 se muestra el tiempo necesitado para cada tarea agrupado por género. Se observa que las mujeres han necesitado aproximadamente un 50% más tiempo que los hombres en todas las tareas.

**Figura 2: Tiempo de los participantes desagregado por género para realizar las tareas.**



## 4.2 Resultados sobre la percepción de uso

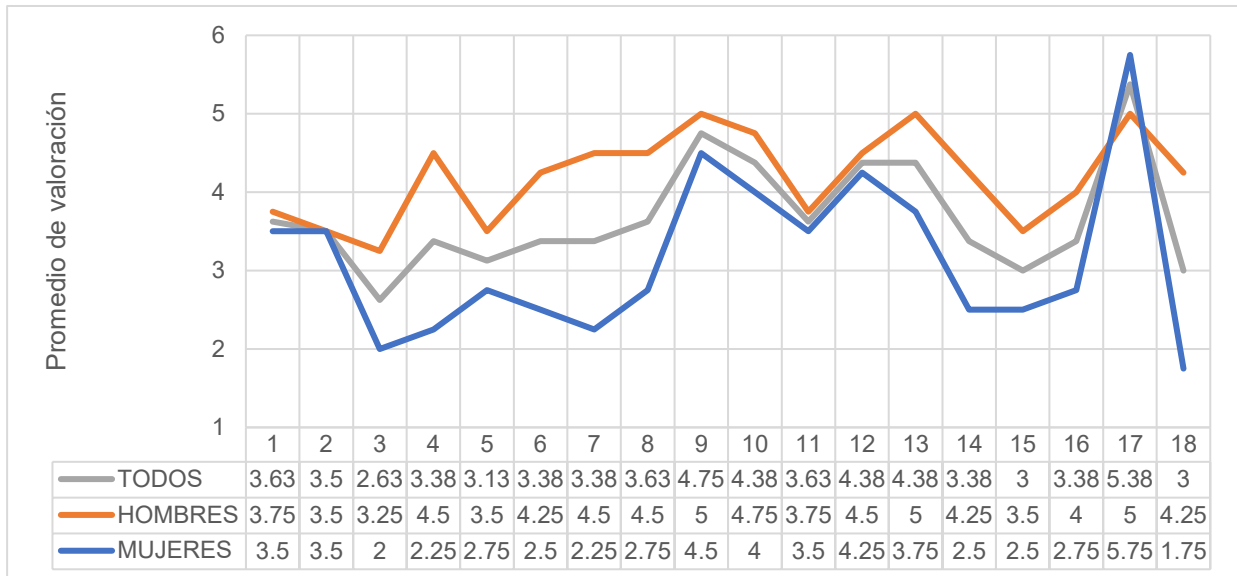
### 4.2.1 Medida de autoeficacia con el robot

En el cuestionario SE-HRI (von der Pütten & Bock, 2018) se ha obtenido un valor de Cronbach Alfa de 0,913, lo que indica que el cuestionario tiene una alta consistencia interna. El promedio total obtenido es de 3,68, que indica que los participantes no han sentido que el robot les ha ayudado a ser más eficaces. Aun así, se ha de tener en cuenta que se trataba de una relación persona-robot en términos de cooperación según la clasificación de L. Wang et al., (2019) y

X. V. Wang et al. (2018), porque han compartido espacio de trabajo, fuente y el proceso es simultáneo y secuencial. Sin embargo, no han compartido tarea.

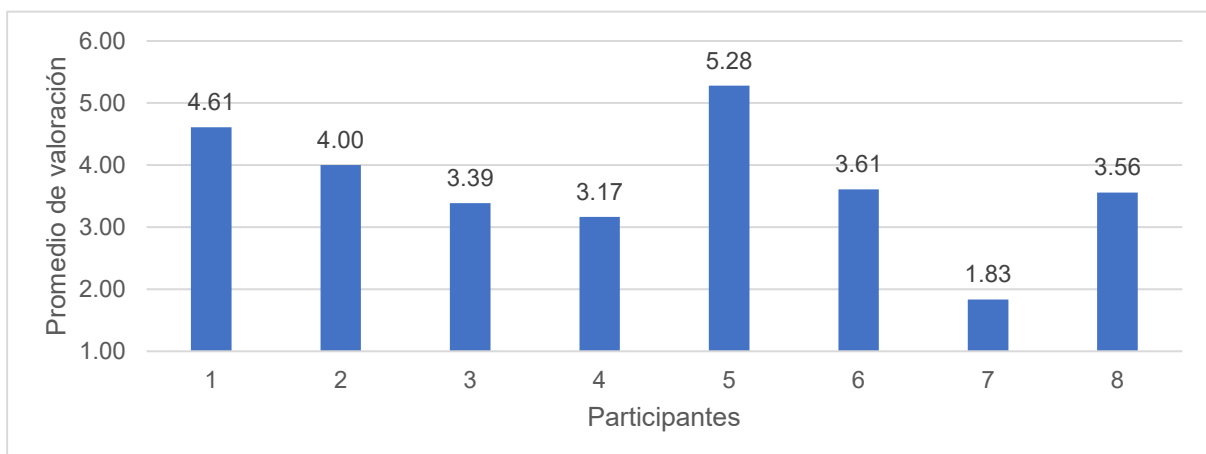
La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en cada uno de los ítems desagregados por género. En coherencia con los resultados de desempeño, se observa que las mujeres han valorado peor que los hombres.

**Figura 3: Resultados obtenidos sobre la percepción de uso mediante el cuestionario SE-HRI en promedio y desagregados por sexo.**



En la Figura 4 se muestra el promedio de valoración en el cuestionario SE-HRI por participante. Se observa que el participante que peor ha valorado la autoeficacia, lo ha valorado con un 1,83 y es también la persona que peores resultados de desempeño ha obtenido. Por el contrario, la persona que mejor ha valorado la autoeficacia lo ha valorado con un 5,28.

**Figura 4: Promedio de los resultados obtenidos en el cuestionario SE-HRI por participante.**

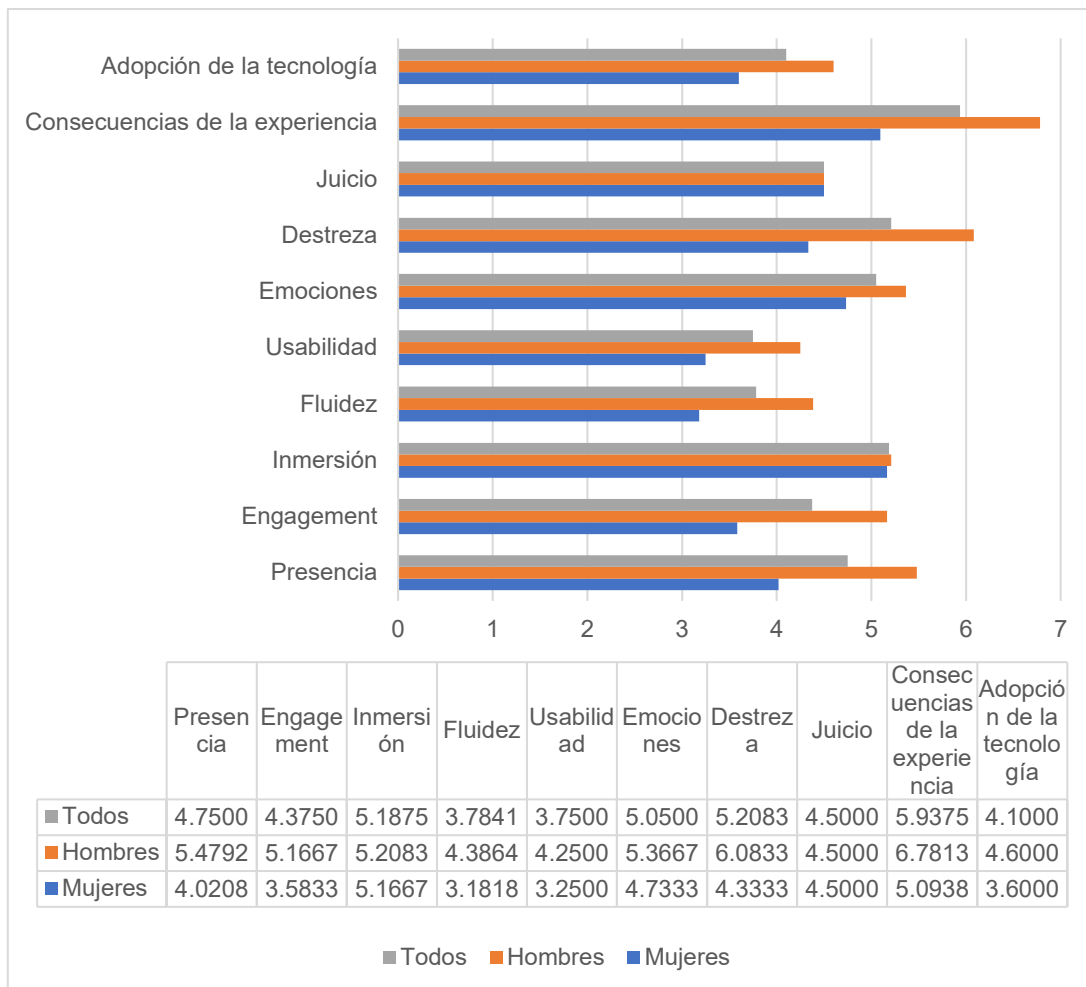




#### 4.2.2 UX en RV

Para evaluar la experiencia de las personas participantes en la experimentación, se ha utilizado el cuestionario propuesto por Tcha-Tokey et al. (2016). Se trata de un cuestionario específico para evaluar la UX en entornos inmersivos. En la Figura 5 se recoge el valor medio que se ha obtenido en cada sub-constructo desagregados por género. En este caso se observa también que los participantes han valorado mejor el sub-constructo “consecuencias de la experiencia”, que indica los participantes no han sufrido consecuencias como mareos, fatiga, dolor de cabeza, vértigo, etc. consecuentes de la interacción en la RV. El sub-constructo peor valorado es “usabilidad”. Del mismo modo que en el cuestionario anterior, se observa que las mujeres han valorado peor que los hombres.

**Figura 5: Valores generales recogidos en el cuestionario de Tcha-Tokey et al. (2016).**



### 5. Conclusiones y líneas futuras

En el contexto de HRI el rol de las personas seguirá siendo importante. Esta relación mutua entre personas y robots da lugar a un potente marco de colaboración con un impacto positivo en la productividad y la flexibilidad. Para poder sacar lo mejor de las personas durante la interacción, es necesario tener un enfoque centrado en las personas. Es imprescindible conocer cuál es la percepción de las personas. Por ello, analizar la UX de estos entornos resulta de gran relevancia. El usuario ha de percibir al robot como un aliado, de modo que aprovechen las fortalezas de ambos para un mismo objetivo común. Por lo tanto, trabajar

aspectos de la interacción influiría notablemente en la optimización de los entornos de trabajo, mejorando las condiciones de trabajo y además aumentando la efectividad en su uso.

El objetivo de esta investigación ha sido evaluar la UX de los participantes en un entorno virtual concreto donde debían cooperar con un brazo robótico. Se considera que el planteamiento propuesto es correcto y exhaustivo. Sin embargo, existen algunas limitaciones. Primeramente, el tamaño de la muestra. Quedaría por validar el test con una muestra más amplia para profundizar de forma precisa e indagar aún más en este campo.

El cuestionario SE-HRI (von der Pütten & Bock, 2018) es un cuestionario aplicable para este tipo de experimentaciones ya que obtiene resultados fiables y significativos sobre la autoeficacia percibida por las personas a la hora de interactuar con un robot. Por su parte, el cuestionario de UX en RV propuesto por Tcha-Tokey et al. (2016) ha contribuido en entender mejor cómo se ha dado la experiencia en el entorno y la percepción que han tenido los usuarios sobre la misma.

Por otro lado, no se observa relación entre la experiencia previa con robots con un mejor desempeño de las tareas. Por el contrario, parece que hay una clara relación entre haber utilizado la RV previamente, ya que los participantes que tienen experiencia previa en RV obtienen mejores resultados en el desempeño. Como línea futura, se identifica la oportunidad de investigar si esta experiencia con el robot en RV beneficia el desempeño en el contexto real e indagar si de este modo sería un buen método de entrenamiento para los operadores.

Finalmente, se ha observado una gran diferencia entre hombres y mujeres tanto en el desempeño de las tareas ejecutadas como en su percepción. Las mujeres han necesitado más tiempo para ejecutar las tareas y han valorado peor en los cuestionarios subjetivos. A pesar de que debido al tamaño y a la homogeneidad de la muestra estos resultados no son definitivos, es conveniente indagar en futuras investigaciones para contribuir en la disminución de la brecha digital de género.

Como trabajo futuro, se observa la posibilidad de incluir medidas psicofisiológicas ya que podría ser beneficioso, por un lado, para obtener datos objetivos de la interacción persona-robot y entender la compleja relación, y, por otro lado, para obtener información que pueda permitir diseñar soluciones que tengan un impacto positivo en el operador, y, en consecuencia, en el proceso productivo. A raíz del estudio realizado se concluye que la evaluación de la UX mediante la combinación de diferentes métodos, herramientas y dispositivos fisiológicos podría ser beneficiosa, ya que se evaluaría la interacción teniendo en cuenta diferentes tipos de información. En este sentido, los dispositivos fisiológicos proporcionarían datos cuantitativos y objetivos sobre el usuario en el momento de la interacción; y, los cuestionarios, obtendrían los datos cualitativos y subjetivos, útiles para entender la percepción que el usuario tiene del producto.

## Referencias

- Benyon, D. (2019). *Designing User Experience: a guide to HCI. UX and Interaction Design*.
- Boden, M., Bryson, J., Caldwell, D., Dautenhahn, K., Edwards, L., Kember, S., Newman, P., Parry, V., Pegman, G., Rodden, T., Sorrell, T., Wallis, M., Whitby, B., & Winfield, A. (2017). Principles of robotics: regulating robots in the real world. *https://doi.org/10.1080/09540091.2016.1271400*, 29(2), 124–129. <https://doi.org/10.1080/09540091.2016.1271400>
- Chen, M., Nikolaidis, S., Soh, H., Hsu, D., & Srinivasa, S. (2020). Trust-aware decision making for human-robot collaboration: Model learning and planning. *ACM Transactions on*

- Human-Robot Interaction (THRI)*, 9(2), 1–23.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3359616>
- Colim, A., Faria, C., Braga, A. C., Sousa, N., Rocha, L., Carneiro, P., Costa, N., & Arezes, P. (2020). Towards an Ergonomic Assessment Framework for Industrial Assembly Workstations—A Case Study. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 3048, 10(9), 3048. <https://doi.org/10.3390/APP10093048>
- Colim, A., Morgado, R., Carneiro, P., Costa, N., Faria, C., Sousa, N., Rocha, L. A., & Arezes, P. (2021). Lean Manufacturing and Ergonomics Integration: Defining Productivity and Wellbeing Indicators in a Human–Robot Workstation. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 1931, 13(4), 1931. <https://doi.org/10.3390/SU13041931>
- Dautenhahn, K. (2013). *Human-Robot Interaction | The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.* <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-encyclopedia-of-human-computer-interaction-2nd-ed/human-robot-interaction>
- de Giorgio, A., Romero, M., Onori, M., & Wang, L. (2017). Human-machine Collaboration in Virtual Reality for Adaptive Production Engineering. *Procedia Manufacturing*, 11, 1279–1287. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.255>
- Díaz-Oreiro, I., López, G., Quesada, L., & Guerrero, L. A. (2019). Standardized questionnaires for user experience evaluation: A systematic literature review. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 31(1), undefined. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/proceedings2019031014>
- Gammieri, L., Schumann, M., Pelliccia, L., di Gironimo, G., & Klimant, P. (2017). Coupling of a Redundant Manipulator with a Virtual Reality Environment to Enhance Human-robot Cooperation. *Procedia CIRP*, 62, 618–623. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.06.056>
- Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., & Vidoni, R. (2020). Design of Human-Centered Collaborative Assembly Workstations for the Improvement of Operators' Physical Ergonomics and Production Efficiency: A Case Study. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 3606, 12(9), 3606. <https://doi.org/10.3390/SU12093606>
- Harriott, C. E., Zhang, T., & Adams, J. A. (2013). Assessing physical workload for human–robot peer-based teams. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(7–8), 821–837. <https://doi.org/10.1016/J.IJHCS.2013.04.005>
- ISO 9241-210. (2019). Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems. In *International Standard: Vol. 2.Udgave.*
- Kahn Jr, P. H., Ishiguro, H., Friedman, B., Kanda, T., Freier, N. G., Severson, R. L., & Miller, J. (2007). What is a Human?: Toward psychological benchmarks in the field of human–robot interaction. *Interaction Studies*, 8(3), 363–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1075/is.8.3.04kah>

- Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Pannek, J., & Thoben, K.-D. (2017). Safety Requirements in Collaborative Human–Robot Cyber-Physical System. *Lecture Notes in Logistics*, 41–51. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45117-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45117-6_4)
- Lindblom, J., & Alenljung, B. (2020). The ANEMONE: Theoretical Foundations for UX Evaluation of Action and Intention Recognition in Human-Robot Interaction. *Sensors*, 20(15), 4284. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s20154284>
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review. *Robotics 2019*, Vol. 8, Page 100, 8(4), 100. <https://doi.org/10.3390/ROBOTICS8040100>
- Matsas, E., Vosniakos, G.-C., & Batras, D. (2016). Modelling simple human-robot collaborative manufacturing tasks in interactive virtual environments. *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference*, 1–4. <https://doi.org/10.1145/2927929.2927948>
- Maurice, P., Padois, V., Measson, Y., & Bidaud, P. (2017). Human-oriented design of collaborative robots. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 57, 88–102. <https://doi.org/10.1016/J.ERGON.2016.11.011>
- Mazmela Echave, M., Lasa Erle, G., & Apraiz Iriarte, A. (2020). Aproximación multimétodo para medir el impacto de los factores de diseño en la apropiación de un software de inteligencia competitiva. *DYNA New Technologies*, ISSN-e 2386-8406, Vol. 7, Nº. 1, 2020, 7(1), 8. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7702107&info=resumen&idioma=SPA>
- MindRend Technologies. (2020, August 6). *VR Robotics Simulator en Steam*. [https://store.steampowered.com/app/683880/VR\\_Robotics\\_Simulator/](https://store.steampowered.com/app/683880/VR_Robotics_Simulator/)
- Prati, E., Peruzzini, M., Pellicciari, M., & Raffaelli, R. (2021). How to include User eXperience in the design of Human-Robot Interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102072. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2020.102072>
- Prati, E., Villani, V., Peruzzini, M., & Sabattini, L. (2021). An Approach Based on VR to Design Industrial Human-Robot Collaborative Workstations. *Applied Sciences 2021*, Vol. 11, Page 11773, 11(24), 11773. <https://doi.org/10.3390/APP112411773>
- Schrepp, M., Hinderks, A., & Thomaschewski, J. (2014). Applying the user experience questionnaire (UEQ) in different evaluation scenarios. *International Conference of Design, User Experience, and Usability*, 383–392. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-07668-3\\_37](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-07668-3_37)
- Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., & Richir, S. (2016). A questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments. *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference*, 1–5.
- Vermeeren, A. P. O. S., Law, E. L.-C., Roto, V., Obrist, M., Hoonhout, J., & Väänänen-Vainio-Mattila, K. (2010). User experience evaluation methods: current state and development needs. *Proceedings of the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*:

*Extending Boundaries*, 521–530.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1145/1868914.1868973>

*VIVE Pro Full Kit | VIVE European Union*. (n.d.). Retrieved November 2, 2021, from <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro-full-kit/>

von der Pütten, A. R., & Bock, N. (2018). Development and Validation of the Self-Efficacy in Human-Robot-Interaction Scale (SE-HRI). *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 7(3). <https://doi.org/10.1145/3139352>

Wallach, D., Conrad, J., & Steimle, T. (2017). The UX metrics table: A missing artifact. *International Conference of Design, User Experience, and Usability*, 507–517. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-58634-2\\_37](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-58634-2_37)

Wang, L., Gao, R., Váncza, J., Krüger, J., Wang, X. v., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2019). Symbiotic human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(2). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>

Wang, Q., Cheng, Y., Jiao, W., Johnson, M. T., & Zhang, Y. M. (2019). Virtual reality human-robot collaborative welding: A case study of weaving gas tungsten arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 48, 210–217. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2019.10.016>

Wang, X. V., Seira, A., & Wang, L. (2018). Classification, personalised safety framework and strategy for human-robot collaboration. *Proceedings of International Conference on Computers & Industrial Engineering, CIE*.

Waschull, S., Bokhorst, J. A. C., Molleman, E., & Wortmann, J. C. (2020). Work design in future industrial production: Transforming towards cyber-physical systems. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.053>

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

