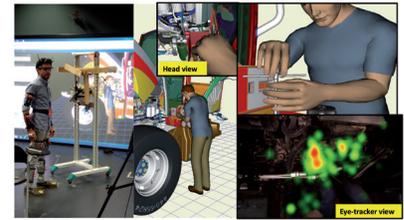


Una configuración de realidad virtual multimodal para el diseño centrado en el ser humano de estaciones de trabajo industriales



A multimodal virtual reality set-up for human-centered design of industrial workstations



Margherita Peruzzini, Marcello Pellicciari, Fabio Grandi y Angelo-Oreste Andrisano

Università di Modena e Reggio Emilia. Dpto. Ingegneria "Enzo Ferrari". Via Vivarelli, 10- 41125 Modena (Italia)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8889> | Recibido: 03/07/2018 • Inicio Evaluación: 10/07/2018 • Aceptado: 17/10/2018

ABSTRACT

Although the so-called Industry 4.0 trend is promoting the increasing automation of processes in the factories of the future, manual activities still play an extremely important role within the factory and human factors greatly affect the process performance. However, the analysis of human-machine interaction and the prediction of human performance in industry are difficult but crucial to have an optimized design of workspaces and interfaces, reducing time and cost of implementation, and avoiding late design changes. This research adopts a multimodal human-centered approach for the analysis of human-machine interaction, and proposes a multimodal experimental set-up for the evaluation of the workers' experience to support the design of industrial workstations. The set-up combines virtual mock-ups, interaction with both physical and virtual objects, and monitoring sensors to track users and analyze their actions and reactions. It allows creating a multimodal environment able to deepen the interaction between humans and systems or interfaces, to support design activities. Indeed, it has been demonstrated that the analysis of the reactions of the users involved, allows to evaluate the quality of the interaction, identify the critical issues, define corrective actions, and propose guidelines for system design or redesign [1]. The paper describes the application of the proposed set-up on two industrial case studies and reports the main results.

• **Keywords:** Virtual Reality; Human Factors; Human-Centered Design; Digital Manufacturing; Industry 4.0.

RESUMEN

Aunque la llamada tendencia Industria 4.0 promueve la creciente automatización de los procesos en las fábricas del futuro, las actividades manuales siguen desempeñando un papel muy importante dentro de la fábrica y los factores humanos afectan en gran medida al rendimiento de los procesos. Sin embargo, el análisis de la interacción hombre-máquina y la predicción del rendimiento humano en la industria son difíciles pero cruciales para tener un diseño optimizado de los espacios de trabajo y de las interfaces, reduciendo el tiempo y el coste de la implementación y evitando los cambios tardíos en el diseño. Esta investigación adopta un enfoque multimodal centrado en el ser humano para el análisis de la interacción hombre-máquina, y propone un sistema experimental multimodal para la evaluación de la experiencia de los trabajadores para apoyar el diseño de estaciones de trabajo

industriales. La configuración combina maquetas virtuales, interacción con objetos físicos y virtuales, y sensores de seguimiento para rastrear a los usuarios y analizar sus acciones y reacciones. Permite crear un entorno multimodal capaz de profundizar la interacción entre los seres humanos y los sistemas o interfaces, para apoyar las actividades de diseño. De hecho, se ha demostrado que el análisis de las reacciones de los usuarios involucrados permite evaluar la calidad de la interacción, identificar los problemas críticos, definir acciones correctivas y proponer directrices para el diseño o rediseño del sistema [1]. El documento describe la aplicación del sistema propuesto en dos estudios de caso industriales e informa sobre los principales resultados.

Palabras clave: Realidad Virtual, Factores Humanos, Diseño Centrado en el Ser Humano, Fabricación Digital, Industria 4.0.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 apunta a repensar las fábricas mediante el uso de tecnologías digitales para crear gemelos virtuales de los sistemas reales interactuando con sensores avanzados [2]. A pesar de la creciente automatización de los procesos, las actividades manuales y la actuación humana todavía desempeñan un papel importante dentro de las fábricas. De hecho, la calidad de la interacción hombre-máquina afecta fuertemente a la eficiencia de los procesos y a la calidad del producto tal y como lo demuestran numerosos estudios [3]. En la industria, la simulación de la interacción humana con los sistemas, equipos e interfaces es posible actualmente gracias al uso de herramientas de Fabricación Digital (DM), que permiten la creación de simulaciones realistas de estaciones de trabajo que también tienen en cuenta la interacción con seres humanos para una rápida y eficaz del proceso de optimización del diseño del producto antes de que éste se fabrique. De hecho, en los últimos 20 años, numerosos estudios muestran los efectos negativos de la falta de atención a los aspectos humanos dentro de la fábrica, en particular sobre la productividad, la calidad de la producción, la seguridad y los costes [4-5]. Estas demostraciones están impulsando a las empresas a prestar una creciente atención a la evaluación de la actuación humana mediante el aumento de la utilización de diferentes métodos ergonómicos (p. ej. NIOSH, OCRA, Articulación Flexus, Reba, Wera). Sin embargo, estos métodos se utilizan como validación de la etapa final del proceso, una vez realizado, y son difícilmente aplicables para apoyar las fases reales del diseño. Sólo los enfoques preventivos pueden asegurar una optimización del diseño de sistemas indus-

triales antes de su creación para ahorrar dinero y tiempo [6]. Esto es posible mediante la creación de prototipos virtuales y la evaluación preventiva de los factores humanos gracias a maquetas digitales (*Digital Mock-Ups-DMU* en inglés) (por ejemplo, Siemens, DS Delmia, JACK). Estas herramientas permiten la simulación de los puestos de trabajo, las tareas a realizar, acciones y actuaciones humanas gracias a modelos digitales o digitalizados. Finalmente, el uso de las tecnologías de Realidad Virtual y Realidad Mixta (RV y RM) pueden dar soporte a la validación en modelos digitales gracias a la participación de usuarios reales [7].

No obstante, las simulaciones digitales generalmente no son capaces de garantizar una estimación fiable de las condiciones de trabajo, teniendo en cuenta también aspectos cognitivos y subjetivos, ya que las simulaciones se refieren generalmente a análisis discretos sobre posturas, supervisadas o previstas, y no tienen en cuenta la dinámica de las condiciones de trabajo ni los aspectos cognitivos, en general el estrés y la carga de trabajo, ni la experiencia vivida por los trabajadores. A fin de superar estas limitaciones, el seguimiento de los parámetros vitales, tanto fisiológicos (por ejemplo, frecuencia cardíaca (FC), la actividad cerebral (EEG), la respiración (BPM) y de actuación (por ejemplo, seguimiento del movimiento, el consumo de energía metabólica) de los operadores puede apoyar válidamente el análisis de estrés y la tensión, así como la identificación de las condiciones críticas de trabajo [8].

La combinación de maquetas virtuales, la interacción con objetos físicos y virtuales, y sensores de vigilancia para realizar el seguimiento de los usuarios y analizar las reacciones y sentimientos, permite crear un medio multimodal capaz de profundizar en la interacción entre los seres humanos y los interfaces o sistemas, para apoyar las actividades de diseño. De hecho, desde el análisis de las reacciones de los usuarios involucrados, es posible evaluar la calidad del proceso de diseño, identificar las cuestiones críticas, definir acciones correctivas y proponer pautas para el diseño (en el caso de nuevos sistemas) o rediseño (en el caso de rediseñar los sistemas existentes). La disposición propuesta se puede aplicar en diferentes áreas de aplicación del diseño industrial (por ejemplo, fabricación, montaje, servicio).

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La fabricación se ha reconocido como uno de los principales pilares de los países civilizados y del estilo de vida, así como de gran cantidad de investigadores interesados en la fabricación sostenible en los últimos 10 años [9]. La fabricación sostenible no sólo está impulsada por factores ambientales y de costes, sino también por la responsabilidad social y los factores humanos [10]. En este contexto, la ergonomía es extremadamente importante para el diseño de las estaciones de trabajo, considerando no sólo la maquinaria y su interfaz con los operadores, sino también los procesos de producción y el entorno de trabajo. La ergonomía es la ciencia del diseño de la interacción humana con los equipos y puestos de trabajo teniendo en cuenta aspectos físicos, cognitivos y organizacionales. La Ergonomía Física se preocupa por el estudio de las relaciones entre las características antropométricas, fisiológicas y biomecánicas, y los parámetros dinámicos o estáticos del esfuerzo físico en el trabajo. Las características más importantes incluyen factores de riesgo de seguridad y salud tales como posturas de trabajo, manipulación de materiales, los movimientos repetitivos, que son causas posibles de trastornos musculoesqueléticos de origen laboral (TME de origen laboral) [11]. La Ergonomía Cognitiva implica procesos psicológicos tales como la conciencia, la elaboración de información y respuesta a de movimientos, en lo que respecta

a la interacción humana con los demás componentes del sistema. Esto incluye el análisis de la carga de trabajo mental, la toma de decisiones, la percepción, la atención, la memoria y el aprendizaje, de acuerdo con la norma EN ISO 10075-1 [12]. Teniendo en cuenta los operadores de sistemas industriales, la carga de trabajo mental se debe a la combinación de los aspectos cognitivos (por ejemplo, la información a ser procesada) y a las reacciones emocionales (por ejemplo, satisfacción y motivación, como consecuencias de las actividades de trabajo).

En este contexto, se ha demostrado que el diseño del entorno de trabajo afecta directamente a la calidad de vida de los trabajadores, así como a la calidad de la producción, lo que influye en la salud de los trabajadores, la seguridad y el rendimiento [13]. Además, los recientes desarrollos tecnológicos hacen que el sistema adquiera una enorme cantidad de datos sobre las máquinas, las condiciones del entorno, y de los seres humanos a fin de investigar las interacciones hombre-sistema y poner de relieve las principales criticidades. Por ejemplo, Romero et al. [15] exploró los aspectos sociales en torno al llamado "operador 4.0" dentro de la fábrica inteligente, donde los seres humanos, las máquinas y los sistemas de software colaborarán en tiempo real para apoyar la fabricación y las operaciones de servicios. Una reciente investigación [14] propuso una herramienta para organizar los datos sociales en una planta de producción para estudiar las condiciones de los trabajadores y sus actuaciones; además, se ha debatido acerca del beneficio de los sistemas de ciber fabricación y su papel en el desarrollo futuro [16]. Sin embargo, en todos los casos se ha estudiado la interacción cuando ésta tiene lugar, después de hacer la definición y realización del área de trabajo, por lo que la ergonomía se aplica de acuerdo a una perspectiva correctiva. Se puede lograr una mayor contribución cuando se tienen en cuenta las cuestiones sociales durante el diseño del puesto de trabajo según un enfoque preventivo. Para ello, se pueden emplear las tecnologías digitales e interactivas para reproducir la interacción hombre-sistema [17-18]. Mediante el uso de dichas tecnologías se pueden simular las tareas humanas, y las actuaciones humanas se pueden reproducir realmente en modelos digitales humanos (DHMs en inglés). Empleando estas herramientas se pueden analizar los atributos biomecánicos de determinadas posturas, el ámbito visual, y la envolvente de alcance de usuarios que representan poblaciones específicas [19-20]. Algunas herramientas también incluyen métodos ergonómicos de evaluación del riesgo para la salud humana como la ecuación NIOSH, el análisis rápido de las extremidades superiores (RULA), El sistema Ovako de análisis de posturas de trabajo (OWAS), proporcionando una representación rápida, virtual de los seres humanos en un entorno de trabajo simulado para identificar problemas ergonómicos. Además, se puede utilizar la realidad virtual (VR) para simular la interacción hombre-sistema recreando un entorno inmersivo 3D donde los usuarios están inmersos, utilizando modelos humanos virtuales para reproducir la interacción humana para análisis de ergonomía de producto [21-22]. Esos estudios demostraron que las simulaciones digitales permiten detectar problemas de diseño de antemano, reduciendo el tiempo y costo de elaboración de prototipos.

3. EL ENFOQUE MULTIMODAL

3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La investigación adopta un enfoque centrado en el ser humano en el diseño integrado del producto-proceso para el análisis de la interacción hombre-máquina, basado en el modelo de interacción

propuesto por Norman [23]. Sobre la base de este modelo, se ha definido y desarrollado una configuración experimental multimodal para la evaluación de la experiencia de los trabajadores y el diseño de sistemas industriales y estaciones de trabajo. Esta investigación propone un enfoque centrado en el ser humano para el análisis de la interacción hombre-máquina, basados en la creación de un espacio de interacción multimodal y virtual donde se sumergen los usuarios y puede simular la experiencia de los trabajadores durante las etapas de diseño, para anticipar la validación de producto-proceso. El enfoque propuesto permite analizar la experiencia de los trabajadores basado en el estudio de la interacción entre los seres humanos y el producto o sistema virtual, digitalizadas y simuladas por un prototipo digital. La evaluación de la actuación humana se basa en el uso de sensores para el análisis en tiempo real de los parámetros fisiológicos y datos de actuación (es decir, los movimientos del cuerpo), junto con la recogida de las apreciaciones subjetivas. Este enfoque ha sido tradicionalmente teorizado por Marinello et al. [24]; ellos sugieren el uso de sensores adecuados para recopilar datos humanos para proporcionar una retroalimentación objetiva sobre el estado del usuario, y la captura de movimientos para cuantificar la actividad humana y permitir medidas en tiempo real, así como medidas a largo plazo sobre la ergonomía física y la carga de trabajo. Además, la recopilación de valoraciones subjetivas de los usuarios basadas en la métrica estándar es útil para proporcionar una interpretación personal de la carga de trabajo y la comodidad.

La presente investigación se suma a este enfoque de la adopción de una simulación digital inmersiva: se utilizan maquetas digitales (DMU en inglés) así como representaciones virtuales de objetos, productos y procesos, para apoyar el desarrollo del producto e integrar el diseño de producto-proceso simulando la interacción del usuario con los sistemas, mientras que un entorno de simulación virtual inmersiva permite emular las condiciones reales de trabajo antes de producir los sistemas reales y para simular las tareas humanas. Además, la *co-presencia* de elementos virtuales y reales en un espacio de Realidad Mixta permite la participación directa de los usuarios finales, haciendo que trabajen en el entorno simulado ejecutando actividades de una manera más realista utilizando también objetos reales, a fin de reproducir fielmente las condiciones de trabajo y de obtener una retroalimentación subjetiva fiable.

La metodología de investigación se basa en la ejecución de la tarea de análisis y validación, así como de la simulación digital, y la virtualización mediante tecnologías de Realidad Virtual (VR en inglés) permite crear una configuración de Realidad Mixta para apoyar el diseño centrado en el ser humano tanto del producto (un tractor, en particular la cabina) como de procesos (considerando principalmente las tareas de montaje). Análisis de las tareas permite centrarse en aquellas actividades que se van a simular subdividiéndolas en sub-tareas, identificando los parámetros fijos y variables de la simulación así como las condiciones externas, y destacando las interacciones del sistema humano. Los modelos digitales se reproducen en un entorno de Realidad Mixta donde los usuarios reales pueden interactuar directamente con prototipos físicos y virtuales, mientras que se hace un seguimiento de los usuarios mediante tecnologías de captura de movimiento y supervisado por los sensores de los datos fisiológicos.

Se estudia la interacción mediante la recopilación de datos sobre respuestas conductuales y cognitivas a través de un conjunto de métricas, adecuadamente seleccionadas para el estudio de caso específico. La métrica apunta a medir tanto la carga de trabajo físico y cognitivo en términos de confort postural, estrés y fatiga

física, por un lado, y la visibilidad y accesibilidad, simplicidad de acciones, compatibilidad de interacción y satisfacción, por otro. Por último, el análisis de satisfacción se basa en una evaluación subjetiva recogidas por medio de cuestionarios. A los usuarios se les preguntó por medio de un cuestionario acerca de diferentes aspectos: visibilidad, accesibilidad, carga mental, estado emocional (por ejemplo, el estrés, la presión de tiempo), y la percepción de la comodidad. Los cuestionarios se rellenaron inmediatamente después de la ejecución de la tarea, expresando un juicio según una escala de Likert de 5 puntos (1 es mala, 5 es muy bueno). La metodología de evaluación de la interacción humano-sistema ha sido implementada para la configuración específica y que se presenta en el cuadro 1.

3.2. EL SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL VR MULTIMODAL

La configuración de Realidad Virtual propuesta consiste en la combinación de diferentes tecnologías de hardware y software capaces de representar digitalmente los diferentes tipos de estaciones de trabajo y para simular la interacción humana con dispositivos y/o interfaces durante la tarea de simulación. Con este propósito, el sistema incluye herramientas de simulación 3D para la digitalización de la estación de trabajo, tecnologías de Realidad Virtual para la navegación e interacción inmersiva, maquetas físicas realizadas con tecnologías de prototipado rápido cuando se requiere una interacción física, humana y dispositivos de seguimiento para supervisarlos parámetros fisiológicos y conductuales del usuario. En particular, la configuración consiste en:

- Un sistema de seguimiento óptico compuesto de ocho cámaras infrarrojas (Bonita de Vicon) correctamente configuradas según el volumen de trabajo que se va a analizar, y un conjunto de cuerpos rígidos con marcadores reflectantes para la captura de movimiento.
- Una pantalla de gran formato (6x2 metros), retro-proyectada y utilizada en combinación con dos proyectores (Galaxy de Barco) y gafas obturadoras activas (Volfoni) para la visualización estereoscópica en 3D de la escena virtual con un alto nivel de realismo;
- Una herramienta de fabricación digital (Tecnomatix JACK de Siemens) para la creación de la escena virtual y la simulación humana;
- Un *plug-in* JACK (RTI por Haption) para fijar los movimientos del usuario real, detectado por el sistema de seguimiento, a los maniqués virtuales;
- Un sistema de seguimiento de ojos (Gafas 2 de Tobii) para analizar las fijaciones y los movimientos del ojo del usuario;
- Un biosensor multi-paramétrico (BioHarness 3.0 de Zephyr) para el seguimiento de los parámetros vitales en tiempo real (HR y la VFC la frecuencia cardíaca, la respiración (BPM), temperatura (T), el nivel de actividad (VOM) y postura mediante acelerómetros y giroscopios);
- Una cámara de vídeo externa (GoPro Hero 3) para registrar las acciones de los usuarios.

Este sistema se utiliza para simular la ejecución de tareas dentro de un entorno virtual. Si es necesario, de acuerdo con la tarea específica que se va a simular, se prototipan objetos físicos mediante tecnologías de impresión 3D y se insertan en el entorno virtual. Ellos son localizados mediante marcadores y usados por los usuarios en la escena real. Se pide a los usuarios que ejecuten una tarea, normalmente después de un análisis preliminar de la tarea, durante el cual las interacciones del sistema humano se estudian y prevén. La ejecución de la tarea en el entorno real es

guiada por navegación escena virtual y simulación de interacción con objetos virtuales. Los usuarios están equipadas con marcadores y supervisadas a través del sistema de seguimiento, así como cualesquiera otros objetos físicos que se inserta en el análisis. Los usuarios y otros elementos cualesquiera rastreados se virtualizan y luego insertados en la escena virtual. El maniquí virtual personalizado se inserta en la escena virtual para un análisis automático de la carga de trabajo físico y para utilizarse como directrices de diseño. El proyecto ha sido realizado en colaboración con las empresas fabricantes de los equipos con fines de investigación. Para el uso comercial los componentes más caros son las tecnologías de Realidad Virtual (sistema de rastreo óptico, pantalla de gran volumen y proyectores); sin embargo, las tecnologías RealidadVirtual se pueden sustituir por pantallas pequeñas o Gafas de Realidad Virtual (HMDs) y tecnologías de seguimiento más económicas. El sistema de seguimiento de los ojos y las herramientas de Maqueta Digital (JACK + *plug in* Haption) tienen un coste asequible para grandes y medianas empresas (alrededor de 20.000 euros cada uno). El biosensor multi-paramétrico es económico (menos de 2.000 euros).

Durante la ejecución de la tarea, que lleven puesto el sistema de seguimiento de ojos y el sensor biométrico permite hacer un seguimiento de los usuarios durante las simulaciones; los datos recopilados son procesados con un software específico sincronizado respectiva y correctamente. Gracias a la correlación entre los datos supervisados, los parámetros seleccionados y las características específicas de la tarea ejecutada, es posible identificar los aspectos críticos de la interacción. Sobre la base de estos resultados y la simulación virtual, el diseñador es capaz de entender las cuestiones fundamentales del diseño actual y proponer las mejoras más adecuadas mediante la definición de cómo mejorar los sistemas, interfaces y todo el proceso de flujos de trabajo, con el objetivo final de reducir el malestar de los trabajadores, y tanto el estrés físico y cognitivo. Además, la comparación entre las diferentes alternativas de diseño permite identificar la mejor solución, según un enfoque centrado en el ser humano. En particular, la

interacción se mide según un conjunto de métricas, definido de acuerdo con el enfoque de investigación aprobado, centrado en la usabilidad. Las medidas comúnmente utilizadas para la usabilidad son la efectividad, eficiencia y satisfacción del usuario [25]. Para cada medida, se ha sido tenido en cuenta la métrica que encajan con la configuración propuesta. Las métricas utilizadas en el presente estudio se resumen en la Tabla 1. Para cada medición se describe la unidad de medida y el método utilizado para la recopilación de los datos. Estas métricas se pueden ajustar a la evaluación de la actuación de tanto de usuarios principiantes como de expertos" y resaltar diferencias significativas en la ejecución de la tarea.

Se han adoptado diferentes métodos de recopilación de datos. La eficiencia se mide mediante la combinación de análisis de simulación digital, obtenida mediante herramientas de software virtualizado en maniqués. Las métricas tienen en cuenta de tiempo para realizar la tarea, la comodidad postural del usuario (para todas las posturas asumidas durante la ejecución de la tarea) y la visibilidad expresada como la amplitud del área visible con claridad. La eficacia se mide considerando cómo se comporta el usuario durante la ejecución de la tarea y si él/ella se encuentran con algunas dificultades físicas o cognitivas, generalmente expresadas por las solicitudes de ayuda o soluciones alternativas. Los datos se recogen por la observación directa del usuario, llevado a cabo por expertos. El conjunto propuesto permite también añadir nuevos análisis sobre la interacción visual del usuario, gracias a los datos de seguimiento ocular (mapa térmico y ruta sacádica). En particular, la ruta sacádica resalta el número de interacciones visuales necesarias (normalmente, es la tarea más simple y utilizable es la interfaz, y menos son las interacciones), mientras que los mapas de calor revelan las dimensiones del área observada (simplificación de la tarea y utilizable es la interfaz, y menor es el área de interacción). De acuerdo con el enfoque de la evaluación descrita en la sección 3.1, en la Tabla 1 se define y describe un conjunto de métricas para evaluar la interacción hombre-sistema para la configuración de Realidad Virtual propuesta.

Medir	La métrica	Unidad de medida	Método de recogida de datos
Eficiencia	El tiempo para realizar la tarea	Tiempo (min, s)	El análisis de la simulación digital
	Confort postural (más adecuado método ergonómico)	Nivel de comodidad (1-7, 1-4, 1-11...) según diferentes métodos (Articulación Flexus, OWAS, REBA...)	
	Visibilidad	Evaluación heurística del campo de visión (1-10)	
Eficacia	Las solicitudes de ayuda	No.	Observación del usuario
	Soluciones creadas	No.	El análisis de los datos de rastreo ocular
	ruta sacádica (número de interacciones visuales)	No.	
	Mapa de calor (dimensión de la zona con interacción visual)	Área (mm ²)	El análisis de los datos de rastreo ocular
Satisfacción	Visibilidad subjetiva (puede ver correctamente todo lo que necesita?).	Valoración subjetiva (1-5 puntos)	Cuestionario
	Accesibilidad (puede llegar correctamente todo lo que necesita?).		
	Carga mental (es la actividad simple ejecutar?).		
	(Es el estrés emocional para llevar a cabo la tarea apropiada?)		
	Confort percibido (te sientes en una posición cómoda?)		

Tabla 1: métricas para la evaluación de la interacción hombre-sistema en la configuración de Realidad Virtual

4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL SOBRE ESTUDIOS DE CASO INDUSTRIALES

Se ha utilizado la configuración propuesta se ha empleado como ayuda al diseño centrado en el ser humano de diferentes tipos de estaciones de trabajo en el área de sistemas agrícolas. En particular, se analizaron tres tipos de estaciones de trabajo: estaciones de trabajo de montaje, estaciones de trabajo de mantenimiento y estaciones trabajo de control (por ejemplo, la cabina del tractor). Se ha realizado los ensayos experimentales en colaboración con CNH Industrial, empresa interesada en la validación del uso del enfoque multimodal propuesto para diseñar puestos de trabajo (puestos de montaje) y productos (cabinas de tractores).

La figura 1 muestra algunos ejemplos de las estaciones de trabajo reproducidas digitalmente en el entorno de Realidad Virtual. Cuando sea necesario, los usuarios tenían también un modelo físico para hacer más realista la simulación de interacción. Los usuarios involucrados en la ejecución de tareas dentro del entorno virtual, llevaban puestas las tecnologías de seguimiento (rastreador de movimiento ocular y biosensor). En particular, se analizaron con detalle dos estudios de caso:

1. La interacción humano-sistema con una interfaz de control del tractor durante una tarea de arar (estudio de caso no.1);
2. La interacción humano-sistema durante el montaje del filtro de aire de un tractor (estudio de caso no.2).

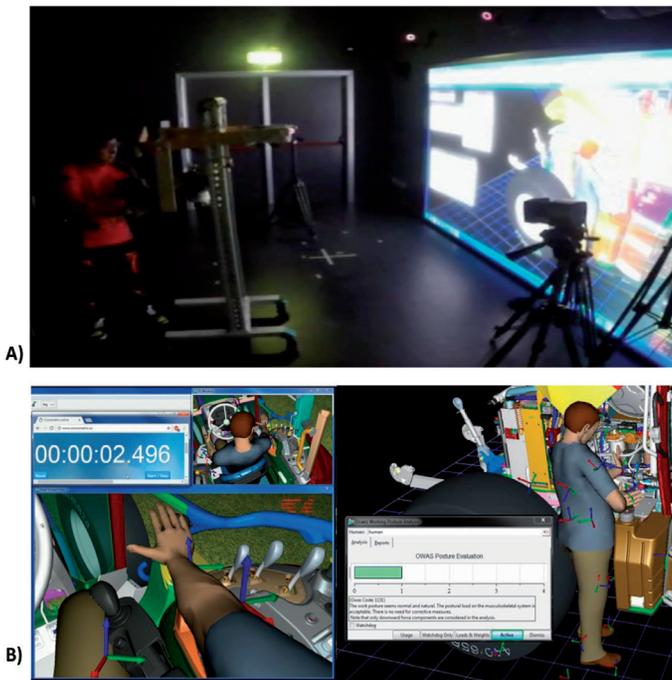


Figura 1: Ejemplos de digitalización de estaciones de trabajo en la configuración de Realidad Virtual (A) y la simulación mediante sistemas de fabricación digital para los dos estudios de caso (B)

En ambos casos, las tareas se simularon utilizando un sistema de simulación digital y se definió un diseño preliminar de estación de trabajo. Sin embargo, esta simulación se basa en la impresión y *feedback* del diseñador, y no permiten considerar la perspectiva del usuario. Cuando el primer diseño estaba listo, los usuarios participaron en la simulación de Realidad Virtual. Para el estudio de caso no.1, se creó un modelo físico del asiento y del volante para que los usuarios adoptaran una situación realista. Para el estudio de caso no.2, se generó una maqueta física de las piezas que se iban a montar para recrear una sensación intensa de inmersión e interacción. En ambos casos, la escena virtual se actualizó en tiempo real de acuerdo al movimiento de los trabajadores gracias a la captura de movimiento, para tener un mayor nivel de realismo. Para cada caso de estudio, estuvieron involucrados 8 usuarios. Éstos tenían un nivel diferente de pericia en las operaciones específicas que se llevaron a cabo (4 sin experiencia y 4 expertos). Para cada usuario, se recogieron datos durante la ejecución de la tarea según las métricas seleccionadas.

En la figura 2 y la figura 3 muestran ejemplos de análisis de datos para el estudio de caso n° 2. La figura 2 presenta el la configuración virtual utilizada para la simulación, la virtualización mediante maquetas virtuales, y un ejemplo de mapa de calor a partir de datos de seguimiento de los ojos. La figura 3 muestra ejemplos de datos fisiológicos y conductuales rastreados durante la ejecución de la tarea por el biosensor, sobre las diferentes sub-tareas (enumerados en el eje x). El gráfico de Frecuencia Cardíaca, medida en pulsaciones por minuto (ppm), compara la actuación de la frecuencia cardiaca entre dos diferentes soluciones de diseño (línea verde y naranja). El gráfico postural, expresado en ángulos de inclinación respecto al eje vertical (grados) y trazado de acuerdo a la duración de cada subtarea, compara los movimientos humanos entre las dos alternativas de diseño. En ambos casos, los valores inferiores pueden sugerir una tarea más cómoda. Por último, el

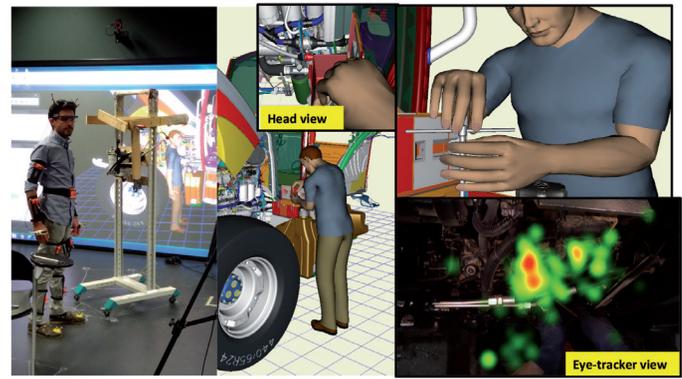


Figura 2. Análisis de la interacción en la escena virtualizada por DMU (estudio de caso no.2)

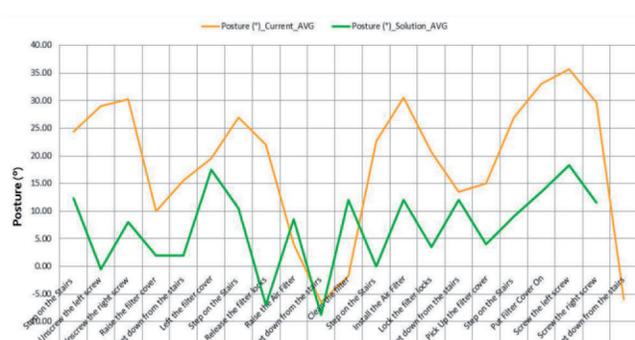
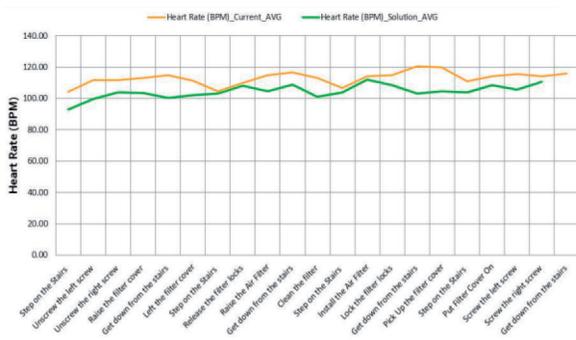


Figura 3: Análisis de interacción humana mediante la supervisión de los datos fisiológicos y conductuales (por ejemplo, Frecuencia Cardíaca y movimientos posturales). Estudio de caso n.2

cuadro 2 sintetiza los resultados promedio sobre del análisis de interacción comparando usuarios sin experiencia y expertos, para los dos estudios de caso. En términos de eficiencia, el análisis de los resultados puso de relieve que los que no tienen experiencia emplean más tiempo que los expertos en ambos casos estudiados; en cambio no existen diferencias relevantes en comodidad postural, evaluadas por la metodología OWAS, relativa al conjunto del filtro de aire. Para cada caso de estudio específico se emplea el mejor método ergonómico (por ejemplo, Dreyfuss3D para tareas sentado en la cabina, OWAS y Articulación Flexus para tareas de montaje permanente).

Para el estudio de caso no.1, El método RULA revela solo pocas diferencias relacionadas con las subtareas específicas, pero en general el valor medio es equivalente para usuarios sin experiencia y expertos. Asimismo, la visibilidad es comparable entre ambos tipos de usuarios. En términos de eficacia, como se esperaba, ambos casos revelaron un mayor número de solicitudes de ayuda de los usuarios principiantes; Las soluciones fueron creadas por usuarios expertos, especialmente en el control del tractor (estudio de caso no.1). En ambos casos, la ruta sacádica reveló que los usuarios sin experiencia tienen muchas más interacciones visuales (44 en promedio para el estudio de caso no.1, 12 en promedio para el estudio de caso no.2), dispersadas en un área mayor que los usuarios expertos (30 en promedio para el estudio de caso no.1, 8 en promedio para el estudio de caso no.2). En el caso de los usuarios expertos, el número de interacciones visuales también pueden ser mayores (Ej. 30 en promedio para el estudio de caso no.2), pero son muy rápidos; tales actuaciones se reflejan también en los mapas de calor, con una dimensión más amplia de la zona explorada por los principiantes. Además, los expertos parecen estar más centrados en los objetivos de la actividad específica, al igual que los comandos, botones o herramientas, mientras que los usuarios

novatos suelen mirar la escena más globalmente. Finalmente, los resultados del cuestionario subjetivo destacaron que las puntuaciones de los principiantes son inferiores a los "expertos". En particular, para el estudio de caso no.2 accesibilidad obtuvo el valor más bajo (2); este resultado podría ser conectado al impedimento de los marcadores en las manos de los usuarios que limita algunos movimientos de precisión en las tareas de montaje cuando el espacio disponible es limitado. Otro resultado relevante se refiere a la sensación de comodidad. Para el estudio de caso No.1 (control del tractor durante una tarea de arar), comodidad valor es afectado por los continuos movimientos de torsión necesario para controlar la pala. En cambio, para el estudio de caso No.2 (conjunto del filtro de aire), la sensación de confort es inferior, principalmente a causa de que los usuarios no se sienten seguros durante la subida a la escalera.

Como resultado de los ensayos experimentales, CNH Industrial determinó que un equipo de diseño por una configuración como ésta para anticipar criticidades de diseño que se suelen detectar en el primer prototipo físico, y para acortar el ciclo de diseño y, en consecuencia, reducir el tiempo de salida al mercado. Además, el entorno de simulación multimodal donde los usuarios pueden simular la interacción con los sistemas durante la interacción con los mandos de cabina durante las tareas de montaje generan de forma precisa y objetiva los requisitos para el rediseño del sistema.

La configuración propuesta dio apoyo con *éxitodiseño* de la cabina del tractor y estaciones de trabajo, para utilizarlas durante las etapas de diseño para evaluar diferentes soluciones conceptualizadas. Además, las cuestiones críticas que se pueden identificar mediante el análisis combinado de los resultados digitales, referidas principalmente a la comodidad de los usuarios mediante técnicas de ergonomía física y los datos fisiológicos y conductuales, de datos de biosensor y rastreo ocular, destacando las condi-

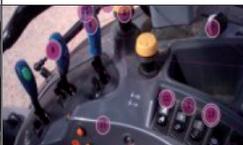
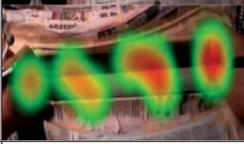
	Métrica	Estudio de Caso no.1 (control del tractor)		Estudio de Caso no.2 (Montaje del filtro de aire)	
		principiante	Experto	Principiante	Experto
Eficiencia	Tiempo para realizar la tarea	tiempo medio 232 seg	tiempo medio 204 seg	tiempo medio 139 seg	tiempo medio 97 seg
	Comodidad postural	RULA nivel 4	RULA nivel 4	OWAS nivel 2	OWAS nivel 2
	Visibilidad	8	7	9	9
Efectividad	Peticiones de Ayuda	0	0	1	0
	Soluciones	0	3	0	1
	Ruta Sacádica (número de interacciones visuales)				
	Mapa de Calor (dimension del área de interacción visual)				
Satisfacción	Visibilidad Subjetiva	3	4	4	5
	Accesibilidad	3	4	2	2
	Carga Mental	3	5	4	5
	Emocional	3	5	4	5
	Comodidad percibida	3	4	3	3

Tabla II: Para el análisis de la interacción entre los dos estudios de caso

ciones más estresantes para los usuarios. Ambos tipos de información pueden apoyar a los diseñadores y analistas en la definición de las tareas críticas para las cuales se requiere el rediseño y se pueden comprobar nuevas soluciones en la configuración de Realidad Virtual para demostrar eficazmente los beneficios esperados.

4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un enfoque centrado en el ser humano para el análisis de la interacción hombre-máquina y propone una configuración multimodal para el análisis de la experiencia de los trabajadores como apoyo al diseño de las estaciones de trabajo industriales. La configuración combina maquetas virtuales, prototipos mixtos que permiten la interacción tanto de objetos físicos como virtuales, y una configuración de sensores de rastreo para hacer un seguimiento de los usuarios y analizar sus acciones y reacciones. La experimentación se basó en la adopción de la configuración propuesta para la revisión del diseño de 2 estaciones de trabajo diferentes. Los resultados demostraron que la configuración propuesta permite evaluar la calidad de la interacción, comparar entre usuarios principiantes y expertos, una disposición de diseño diferente, y definir de acciones correctivas de diseño para rediseñar el sistema. La principal ventaja del enfoque propuesto consiste en tener una retroalimentación precisa, objetivada, acerca de la interacción hombre-máquina, antes de la realización del el producto / proceso, a fin de predecir las criticidades del diseño y para mejorar el sistema global de diseño o rediseño. Esa opinión es fundamental para que las empresas puedan reducir el tiempo de lanzamiento al mercado y para optimizar los costes, así como mejorar la satisfacción y seguridad de los trabajadores, con un gran impacto en la sostenibilidad global. Las principales limitaciones se refieren a los costes y la complejidad de la configuración y a la necesidad de la recopilación múltiple de datos y la sincronización. Pueden superarse mediante la adopción de tecnologías de Realidad Virtual menos costosas (por ejemplo, sustitución de la pantalla de gran tamaño y los proyectores por gafas de Realidad Virtual (HDMs)).

Los trabajos futuros se centrarán en un análisis más profundo del estrés y la definición de una estrategia de diseño para implementarse en la industria para evitar condiciones de trabajo estresantes y crear una rutina automática para la sincronización de datos (p. ej. con Matlab).

REFERENCIAS

[1] Peruzzini, M., Grandi, F., Pellicciari, M., Campanella, E.C. "Análisis de la experiencia del usuario basado en el monitoreo de datos fisiológicos y mixtos para apoyar Human-Centered prototipos de diseño de producto". En: Rebelo, Soares F. M. (eds) avances en ergonomía en el diseño. 2018 AHFE. Los avances en Sistemas Inteligentes y Computación, Springer, Cham, 2019. Vol. 777, p.401-412. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94706-8_44.

[2] Davis, J. Edgar, T., Porter, J. Bernaden Sarli, J. M., "inteligencia de fabricación inteligente y dinámica de la demanda de rendimiento", equipos e Ingeniería Química, 2012, Vol 47, p.145-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.037>

[3] Neumann, W.P., Kolus, A. Wells, R.W. "Los factores humanos en el diseño del sistema de producción y calidad - una revisión sistemática", IFAC Federación Internacional de Control Automático - Documentos en línea, 2016, Vol. 49-12, p.1721-1724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.830>

[4] Peruzzini, M., Grandi, F., Pellicciari, M., Campanella, E.C. "Virtual simulación para mantenimiento socialmente sostenible", procedia de fabricación, 2017, Vol. 11, págs. 1413-1420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.271>.

[5] A.C., Rosenqvist Falck, M. "un modelo para el cálculo de los costos de la mala

Ergonomía conjunto", Int. J. Ergonomía Industrial, 2014, Vol. 44-1, p.140-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.013>

[6] Dul J., Neumann, P. "Ergonomía contribuciones a las estrategias de la empresa", Ergonomía Aplicada, 2009, Volumen 40, p.745-752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.07.001>

[7] Peruzzini, M., Carassai, S. M., Andrisano Pellicciari, A.O. "Diseño centrado en el ser humano de puestos de trabajo ergonómicos en maquetas digitales interactivos", en el avance de la mecánica, la ingeniería de diseño y fabricación, 2016, p.1187-1195. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45781-9_119.

[8] Stanton, N., cobertura, A., Brookhuis, K.A., Salas, E., Hendrick, H.W. Manual de factores humanos y ergonomía métodos, 2004, pág. 201-208, CRC Press. ISBN: 9780415287005

[9] M. Taisch Garetti, M., "fabricación sostenible: tendencias y desafíos" de Investigación, Planificación y Control de Producción, 2012, Vol. 23-2-3, p.83-104. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.591619>

[10] Zink, K.J. "El diseño sostenible sistemas de trabajo: la necesidad de un enfoque de sistemas", 2014, Applied Ergonomics, Vol. 45-1, pág. 126-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.03.023>

[11] Asistencia sanitaria, I., Karwowski, W. Enciclopedia Internacional de Ergonomía y factores humanos, de 2006, CRC Press. ISBN: 9780415304306.

[12] la norma EN ISO 10075-1:2017: principios ergonómicos relativos a la carga de trabajo mental, ISO 2017.

[13] Jokl, M.V. "El efecto del medio ambiente en el rendimiento humano", 1982, Applied Ergonomics, Vol.13-4, pág. 269-280. doi: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(82\)90067-9](https://doi.org/10.1016/0003-6870(82)90067-9)

[14] Gregori, F. Papetti, A. M., Peruzzini Pandolfi, M., Germani, M. "Sistemas de Fabricación Digital: Un marco para mejorar la sostenibilidad social de un sitio de producción", procedia el CIRP, 2017, Vol 63, p.436-442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.113>.

[15] Romero, D., Wuest, T., J., Gorecky Stahre, D. "Fábrica Social Arquitectura: trabajar en red, servicios sociales y escenarios de producción social a través de la Internet de las cosas, servicios y personas para el operador Social 4.0", en H. Lödding et al. (Eds): Los avances en sistemas de gestión de la producción. La ruta inteligente, colaborativo y producción sostenible, 2017, vol. 513, p.265-273. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_31

[16] La Canción, Z., Luna, Y. "evaluar la sostenibilidad de sistemas cybermanufacturing beneficios", Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2016, Vol. 90-5-8, p.1365-1382. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9428-0>

[17] Demirel, H.O., Duffy, V.G. "Aplicaciones de modelado humano digital en la industria", v.g. Duffy (Ed.): modelado humano Digital, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, p.824-832. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-73321-8_93

[18] , Väänänen Aromaa S. K. "Adecuación de prototipos virtuales para apoyar los factores humanos / ergonomía evaluación durante el diseño, ergonomía aplicada, 2016, vol.56, p.11-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.02.015>

[19] Chaffin, D.B., Thompson, D., Nelson, C., Ianni, J.D., Punte, P.A., Bowman, D. Derechos Digitales modelado para vehículo y diseño del lugar de trabajo, SAE International, 2001, p.82-87. ISBN:0768006872.

[20] Plantard, P., Shum, H.P.H., Le Pierres, A.S., Multon, F. "Validación de un método de evaluación ergonómica con Kinect datos reales en las condiciones de trabajo", Ergonomía Aplicada, 2017, Vol 65, p.562-569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.10.015>

[21] , H. Honglun Shouqian, S. Yunheet, P. "Investigación sobre humano virtual en simulación ergonómica", computadoras e Ingeniería Industrial, 2007, Vol 53, p.350-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.027>

[22] Caputo, F., El Greco, A., D'Amato, E. Notaro, I., Spada, S. "sobre el uso de la realidad virtual para un diseño del lugar de trabajo centrada en el ser humano", Procedia la integridad estructural, 2018, Vol 8, p.297-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.031>

[23] Norman, D.A. El diseño de las cosas cotidianas, 2008, Nueva York, Doubleday. ISBN: 9780262525671.

[24] Marinello, F. Pezzuolo, A. Et Simonetti, A. "Cabinas del tractor a la ergonomía analiza por medio de la tecnología de captura de movimiento Kinect", Ciencias de la ingeniería contemporánea, 2015, Vol. 8-28, p.1339-1349. DOI: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.56188>

[25] La Organización Internacional de Normalización, ISO 9241. La ergonomía del sistema humano inter-acción, parte 11. Usabilidad: Definiciones y conceptos, 2008.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación informó que fue posible gracias a la colaboración con el Industrial de CNH.