



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Nuevas tecnologías aplicadas a la ergonomía ocupacional.
Empleo de sensores RGB-D y Eye-Tracking en la mejora ergonómica de
puestos de trabajo.**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Mg. Diana Carolina Garzón Leal

Dirigida por:

Dr. José Antonio Diego Más

Dra. María José Bastante Ceca

**Programa de Doctorado en Tecnologías para la Salud y el Bienestar
Equipo de Investigación: Imágenes Biomédicas y Realidad Virtual.**

Valencia, septiembre de 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Proyectos de Ingeniería Escuela Técnica Superior de Ingeniería del
Diseño.

D. JOSÉ ANTONIO DIEGO MÁZ, PROFESOR TITULAR DE LA UNIVERSIDAD Y Dña. MARIA JOSÉ BASTANTE CECA, PROFESORA CONTRATADA DOCTORA DE UNIVERSIDAD, AMBOS DEL DEPARTAMENTO DE PROYECTOS DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CONSIDERAN: Que la memoria titulada "NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS A LA ERGONOMÍA OCUPACIONAL. EMPLEO DE SENSORES RGB-D Y EYE-TRACKING EN LA MEJORA ERGONÓMICA DE PUESTOS DE TRABAJO" que presenta D^a. DIANA CAROLINA GARZÓN LEAL para aspirar al grado de Doctor por la Universitat Politècnica de València, y que ha sido realizada bajo su dirección en el Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universitat Politècnica de València, reúne las condiciones adecuadas para constituir su tesis doctoral, por lo que AUTORIZAN al interesado para su presentación.

Valencia, septiembre de 2020

Fdo: José Antonio Diego Más

Director de Tesis

Fdo: María José Bastante Ceca

Directora de Tesis

AGRADECIMIENTOS

En estas cortas pero significativas líneas quiero manifestar mis más profundos agradecimientos. En primer lugar, a mis asesores de tesis D. José Antonio Diego Más, por la dedicación incondicional para que la culminación de esta investigación fuese posible en cada una de las fases y a Dña. María José Bastante Ceca, por su valiosa contribución en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Quiero agradecer también a mi familia, por ser mi motor de arranque y constante motivación, demostrando que unidos podemos salir adelante, sin importar las dificultades que se presenten; a mi padre Nevardo por ser el mejor líder, mi madre Carmen Rosa por levantarse y tener la fuerza para estar con nosotros, a mi hermano Alexander y Yasmid por ser incondicionales en cada uno de los proyectos que he planeado en el transcurrir del tiempo.

A mi esposo por darme la mano y acompañarme en cada peldaño que me propongo lograr sin importar las dificultades que se puedan presentar, ya que sin su motivación este camino no hubiera tenido el mismo éxito.

En Bogotá, a la familia Salazar Gutiérrez, por ser mi apoyo moral con sus palabras, pensamientos y metáforas.

Finalmente, En España, a mis amigos Federico Castillo, mis compañeros de Maestría Carlos Brocal Guillen, Nina Rettich, Helena Gatti, Oriana Devia, Sandra Hernandez y Tatiana Rodríguez, por darme fuerzas para culminar este logro tan importante brindándome siempre calor de hogar.

RESUMEN

A mediados del siglo XX inició en el continente europeo, especialmente en Francia y Bélgica, una nueva disciplina denominada Ergonomía Centrada en la Actividad. Esta disciplina está enfocada en el análisis del trabajo con el fin de optimizar las condiciones laborales. El propósito de la intervención ergonómica es mejorar componentes que interactúan en el sistema o en la actividad del trabajo (las personas, la organización, la tecnología y el ambiente), interrelacionando aspectos de salud, seguridad, productividad y calidad. En investigaciones anteriores a la presente el doctorando identificó la necesidad de mejora de las herramientas empleadas por los profesionales para la evaluación de factores de riesgo ergonómico, motivando así el desarrollo de la presente investigación.

Inicialmente se analizaron métodos generales empleados por los diseñadores para establecer aquellos susceptibles de mejora con la introducción de nuevas tecnologías. En una segunda fase se identificaron y analizaron dispositivos tecnológicos orientados al rastreo de la actividad humana aplicables en el ámbito de las metodologías de la ergonomía ocupacional para los sectores productivos. Como resultado se concluyó que los sensores RGB-D y el Eye-Tracking (rastreo ocular) son dispositivos aplicables para ayudar a mejorar las condiciones en los puestos de trabajo, el primero para distribuir las áreas de trabajo y el segundo para la mejora de las interfaces del usuario. En esta TD se desarrollaron técnicas y métodos para el empleo de estos dispositivos logrando el diseño ergonómico de puestos de trabajo con aplicación práctica (artículos 2 y 3).

Durante la realización de esta TD, bajo las directrices del Programa de Doctorado en Tecnologías para la Salud y el Bienestar de la Universidad Politécnica de Valencia, se publicaron tres artículos en revistas que durante el año de su publicación estuvieron indexadas en el primer cuartil de su categoría en el Journal Citation Report, las cuáles sustentan los resultados de la investigación. En ellos se evidenció cómo los avances tecnológicos implementados en Ergonomía producen cambios importantes en el diseño de los puestos de trabajo, y minimizan los tiempos y los movimientos que se requieren en las diferentes actividades laborales, garantizando así una ubicación óptima del recurso humano en los sistemas de producción y generando a su vez estrategias que disminuyen los Trastornos Músculo Esqueléticos (TMEs).

RESUM

A mitjan segle XX es va desenvolupar en el continent europeu, especialment a França i Bèlgica, una nova disciplina denominada Ergonomia Centrada en l'Activitat. Aquesta disciplina està enfocada en l'anàlisi del treball amb la finalitat d'optimitzar les condicions laborals. El propòsit de la intervenció ergonòmica és millorar els components que interactuen en el sistema o en l'activitat del treball (les persones, l'organització, la tecnologia i l'ambient), interrelacionant els aspectes de salut, seguretat, productivitat i qualitat. En investigacions anteriors a la present el doctorand va identificar la necessitat de millora de les eines emprades pels professionals per a l'avaluació de factors de risc ergonòmic, motivant així el desenvolupament de la present investigació.

Inicialment es van analitzar els mètodes habituals emprats pels ergònoms per a establir aquells susceptibles de millora amb la introducció de noves tecnologies. En una segona fase es va identificar i analitzar els dispositius tecnològics orientats al monitoratge de l'activitat humana aplicables en l'àmbit de les metodologies de l'ergonomia ocupacional per als sectors productius. Com a resultat es va concloure que els sensors RGB-D i el Eye-Tracking són dispositius aplicables per a ajudar a millorar les condicions en els llocs de treball, el primer per a distribuir les àrees de treball i el segon per a la millora de les interfícies de l'usuari. En aquesta TD es van desenvolupar tècniques i procediments per a l'ús d'aquests dispositius aconseguint el disseny ergonòmic de llocs de treball amb aplicació pràctica (articles 2 i 3).

Durant la realització d'aquesta TD, sota les directrius del Programa de Doctorat en Tecnologies per a la Salut i el Benestar de la Universitat Politècnica de València, es van publicar tres articles en revistes, que durant l'any de la seua publicació, van estar indexades en el primer quartil de la seua categoria en el Journal Citation Report, les quals sustenten els resultats de la investigació. En ells es va evidenciar com els avanços tecnològics implementats en Ergonomia produeixen canvis importants en el disseny dels llocs de treball, minimitzen els temps i els moviments que es requereixen en les diferents activitats laborals, garantint així una ubicació òptima del recurs humà en els sistemes de producció i generant al seu torn estratègies que disminueixen els Trastorns Músculesquelètics.

SUMMARY

Around the middle of XX century in Europe, especially in France and Belgium, a new discipline named Activity Focused Ergonomics was developed. This concept is based on the task analysis aiming to optimize working conditions. The purpose of the ergonomic intervention is to improve the components interacting within the system or the work activities (people, organization, technology and environment), correlating all health, safety, productivity and quality facts. In previous research, the ergonomists identified the improvement need of those tools used by professionals to assess ergonomic risk factors, enhancing therefore the development of this present research.

In the beginning, regular methods used by ergonomics specialists were analyzed in order to define those that could be improved with the introduction of new technologies. In a second phase, technological devices aimed to monitorize human activity, as well as those applicable for the occupational ergonomics methodologies in productive sectors were identified and analyzed. The conclusion that came as a result was that RGB-D sensors and Eye-Tracking are actual workstations conditions' improving devices, the first one is used to better organize working areas and the second one to optimize the user's interfaces. This Doctoral Thesis develops techniques and procedures to correctly use these devices obtaining workstations ergonomic designs with practical applications (articles 2 and 3).

Along the development of this Doctoral Thesis, under the Polytechnic University of Valencia Doctoral School for Health and Wellbeing Technologies program directions, three articles were published in magazines which, throughout their publication year were indexed within its category's first quartile at the Journal Citation Report, supporting the research results. The articles evidenced how the technological progress implemented in Ergonomics produce important changes in the workstations design and minimize times and movements required in different working activities, ensuring human resources' optimal location within the production systems and also developing Musculoskeletal Disorders reduction strategies.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
RESUM.....	III
SUMMARY.....	IV
TABLA DE CONTENIDO	V
Listado de Tablas.....	IX
Listado de Figuras	X
Listado de Ecuaciones	XII
CAPÍTULO I. INTRODUCCION – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. INTRODUCCIÓN – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. HIPÓTESIS DE LA TESIS DOCTORAL	7
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	9
CAPÍTULO II. – MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES	12
2.1. MARCO TEORICO.....	13
2. 2. ANTECEDENTES	24
CAPÍTULO III. - ARTICULO I.....	29
3.1. Influencias en el uso de métodos observacionales por parte de los profesionales a la hora de identificar factores de riesgo en el trabajo físico.....	30
3.1.1. Resumen	30
3.1.2. Introducción.....	30
3.1.3. Método.....	32

3.1.4. Resultados.....	38
3.1.5. Discusión	42
3.1.6. Conclusiones	44
3.1.7. Referencias.....	46
CAPÍTULO IV. - ARTICULO II.....	49
4.1. Uso de sensores RGB-D y algoritmos genéticos para la optimización de diseños en puestos de trabajo.	50
4.1.1. Resumen.....	50
4.1.2. Introducción.....	50
4.1.3. Diseño de los puestos de montaje	53
4.1.4. Algoritmos Genéticos para resolver problemas de diseño en planta.....	55
4.1.5. Materiales y Métodos	57
4.1.6. Aplicación experimental.....	62
4.1.6.1. Sensibilidad del método a las variaciones de parámetros.....	66
4.1.7. Resultados.....	67
4.1.7.1. Resultados del Análisis de Sensibilidad.....	68
4.1.8. Discusión	68
4.1.9. Conclusiones	72
4.10. Referencias.....	73
CAPÍTULO V. - ARTICULO III.....	79
5.1. Optimización del diseño de las interfaces de usuario mediante el rastreo ocular, movimientos del ratón y algoritmos genéticos.	80
5.1.1. Resumen	80
5.1.2. Introducción.....	80

5.1.3. Principios de diseño, recogida de datos y medición del rendimiento	84
5.1.4. Material y métodos.....	86
5.1.4.1. Definición del Problema.....	86
5.1.4.2. Recogida de Datos.....	87
5.1.4.3. Un algoritmo genético para optimizar el diseño de un PC	89
5.1.5. Aplicación Experimental.....	92
5.1.5.1. Rastreo Ocular.....	94
5.1.5.2. Segunda sesión del experimento	95
5.1.6. Resultados.....	96
5.1.7. Discusión	99
5.1.8. Conclusiones	105
5.1.9. Referencias.....	106
CAPÍTULO VI. - DISCUSIÓN GENERAL y CONCLUSIONES.....	114
6.1. Discusión general de los resultados y conclusiones	115
CAPÍTULO VII. – CONTRASTE DE HIPÓTESIS, APORTACIONES DE LA TD Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACION.	121
7.1. Contraste de hipótesis, aportaciones y líneas futuras.....	122
7.1.1. Validación de las hipótesis y cumplimiento de objetivos	122
7.1.2 Aportaciones realizadas	124
7.1.3. Líneas futuras de investigación.....	125
CAPÍTULO VIII. - REFERENCIAS	126
ANEXOS	142
9.1. Anexo I - Encuesta artículo I.....	143

9.2. Anexo II – Tablas del artículo III147

Listado de Tablas

Tabla 1. Variables medidas mediante rastreo ocular (elaboración propia).....	21
Tabla 2. Profesionales que usaban cada método y frecuencia de uso (porcentajes y frecuencias).....	39
Tabla 3. Resultados a las preguntas sobre los métodos observacionales (porcentajes y frecuencias).....	41
Tabla 4. Resultados de la Prueba de Correlación de Spearman's (r_s y p)	42
Tabla 5. Características de los ítems a distribuir.....	63
Tabla 6. Resultados del Análisis de Sensibilidad	69
Tabla 7. Características de los elementos a ser configurados en el caso de estudio. Las columnas inicial y final muestran el área y la ratio geométrica de cada AOI en el diseño inicial y final. Las columnas Mín y Máx muestran las restricciones geométricas de cada AOI.	93
Tabla 8. Matriz de transición de la PC empleada en las sesiones experimentales. Cada celda representa el número promedio de transiciones de mirada – mirada y mirada – ratón entre las AOIs. Se muestran entre paréntesis las transiciones mirada- ratón.	97

Listado de Figuras

- Figura 1. Rango de variación de la forma de un elemento dadas en las ratios geométricas mínima y máxima..... 58
- Figura 2. Vista esquemática de la configuración del sistema de captura de movimiento. ... 59
- Figura 3. Las manos derecha e izquierda activan dos sensores virtuales en el módulo de rastreo..... 65
- Figura 4. Secuencia de activación de los sensores virtuales y tiempos de activación promedio..... 66
- Figura 5. Diseño del puesto de trabajo inicial (a) y optimizado (b). El grosor de las líneas blancas es proporcional a las relaciones entre las áreas vinculadas. 67
- Figura 6. (a) Áreas de interés (AOI) definidas para cada elemento de la interfaz. De la AOI-1 a la AOI-9 son áreas construidas a partir de indicadores, y de la AOI-10 a la AOI-14 a partir de controles. AOI-A y AOI-B se definieron sobre elementos relacionados a los sistemas de comunicación. (b) Variación de la forma de un elemento del PC entre las ratios geométricas mínima y máxima. Las ratios menores a 1 conducen a orientaciones horizontales. Las ratios mayores a 1 conducen a orientaciones verticales. 85
- Figura 7. Generación de diseños de PC en una PVD a partir de árbol de cortes. Cada hoja de los árboles corresponde a un elemento del PC. Cada nodo interno representa la forma en la que se corta una partición rectangular de la PVD (V vertical, H horizontal), distribuyendo los elementos en cada rama del nodo en cada lado de la partición. Las modificaciones del tipo de corte realizadas en los nodos internos, o en la estructura del árbol, generarán diferentes diseños. 91
- Figura 8. Mapa de calor del rastreo ocular y recorrido del ratón de un usuario. El color rojo representa áreas con un gran número de miradas fijas a lo largo del tiempo. La línea blanca es el recorrido del ratón y los círculos amarillos son los clicks del ratón. (Para interpretar las referencias a color en la leyenda de esta figura, se remite al lector a la versión online de este artículo). 96
- Figura 9. Diseño inicial del PC (a) y diseño optimo (b) obtenidas por el AG. Las ratios (r) de altura-anchura se muestran para cada elemento del PC. 98
- Figura 10. Resultados de las sesiones experimentales. Las barras muestran, para ambos grupos del experimento, los valores medios de la duración total de las tareas para cada

sesión experimental (a), los errores cometidos (b), la puntuación ASQ (c), el número de clicks del ratón (d), y la longitud del recorrido del ratón (e). Las líneas de dispersión indican la desviación típica de la media. 101

Figura 11. Cambio porcentual en los valores promedio de los indicadores de usabilidad, entre sesiones, por grupos de usuarios. 103

Figura 12. Recorrido del ratón (líneas rojas) y clicks (puntos amarillos) de un participante del Grupo B en ambas sesiones experimentales. (a) Sesión experimental 1 con el diseño inicial del PC. (b) Sesión experimental 2 con el diseño final de la PC obtenida por el AG. (Para interpretación de las referencias a colores en esta leyenda, se remite al lector en la versión online de este artículo). 104

Listado de Ecuaciones

Ecuación 1 61

Ecuación 2 66

Ecuación 3 66

Ecuación 4 91

CAPÍTULO I. INTRODUCCION – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUCCIÓN – PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El deterioro de la salud física de los trabajadores, y la pérdida de días laborables, no sólo afectan su bienestar y calidad de vida sino también a la economía de los respectivos países. En 2011 más de 400.000 personas en el Reino Unido sufrieron enfermedades causadas por su trabajo, lo que resultó en 7,5 millones de días perdidos (The Health and Safety Executive, 2014). Según Eurofond, en la actualidad se ha encontrado que los Traumas Músculo Esqueléticos (TMEs) con origen en el trabajo son la principal causa de enfermedad laboral, mostrando que el 22% de la población española refirió ausentarse en el trabajo de 1 a 15 días por motivos de salud. Las condiciones de los puestos de trabajo en el año 2015 muestran que se presentaron movimientos repetitivos de mano y brazo en el 43% de los casos, o los trabajadores requieran adoptar posturas dolorosas o fatigantes entre 1/4 y 3/4 partes del tiempo dispuesto en la jornada laboral en el 32% de la población española (Fourth, Fifth and Sixth European Working Conditions Surveys, 2005, 2010, 2015).

La Prevención de Riesgos Laborales (PRL) se ha conformado para la identificación de las necesidades en los entornos laborales en cuatro especialidades: Medicina del Trabajo, con el objetivo de controlar la salud del trabajador y la relación con la actividad laboral desempeñada; Seguridad en el Trabajo, enfocada a prevenir los accidentes laborales; Ergonomía y Psicología aplicada, especializada en prevenir la fatiga y la insatisfacción laboral y finalmente Higiene Industrial, dedicada a prevenir las Enfermedades Profesionales. Esta Tesis Doctoral (TD) se centra en el ámbito de la Ergonomía, y en concreto, en cómo la aplicación de nuevas tecnologías puede ayudar a la mejora de puestos de trabajo desde el punto de vista ergonómico.

Los TMEs son una de las principales causas de baja en las empresas, y es uno de los factores que se evalúan en un puesto de trabajo agrupando las causas en tres tipos: factores físicos, factores organizativos y psicosociales, y factores individuales. Los dos primeros factores están relacionados con las condiciones propias del puesto de trabajo y la estructura organizativa de la empresa. Existe un elevado grado de evidencia científica sobre la relación del desarrollo de TMEs y la exposición a factores de riesgo tales como los movimientos repetitivos, la aplicación de fuerzas, las posturas forzadas, las vibraciones o la combinación de varios de estos factores (Putz-Anderson, 1997). En los factores de riesgo individuales se incluyen la edad, la antigüedad laboral, el género, el tabaquismo y las dimensiones antropométricas (Diego-Mas et al., 2009). Teniendo en cuenta los requerimientos para la identificación de los factores de riesgo, es importante aplicar herramientas de medición entre las que podemos encontrar: el auto informe, los métodos de observación y la medición directa (Li and Buckle, 1999; David, 2005).

Los métodos de auto informe se pueden aplicar de diferentes formas tales como las escalas de calificación, cuestionarios, listas de verificación o entrevistas; sin embargo, no siempre son fiables y pueden llevar a una interpretación sesgada (Burdorf and Laan, 1991; Wiktorin et al., 1993).

Los métodos de observación consisten en observar directamente al trabajador y las tareas asignadas para evaluarlos con métodos tales como RULA (McAtamney and Corlett, 1993), OWAS, REBA; entre otros; en los que la precisión y la validez de los resultados obtenidos depende directamente de la información recopilada (Diego-Mas et al., 2015, Fagarasanu and Kumar, 2002). El problema es que la recopilación de datos se realiza por observación subjetiva o simple estimación de ángulos y mediciones proyectados en videos o imágenes.

Los métodos directos consisten en recopilar datos directamente de sensores conectados al cuerpo del trabajador, los cuales son difíciles de implementar en entornos reales de trabajo, ya que estos dispositivos pueden causar incomodidad e influir en el comportamiento postural (Li and Buckle, 1999; David, 2005). Esto conduce a una baja precisión y una alta variabilidad en los resultados (Burdorf et al., 1992). Sin embargo, dichos métodos son adecuados para varios tipos de trabajo y siguen siendo una forma práctica de estimar el nivel de riesgo propio al puesto y/o el entorno; buscando así realizar el rediseño del puesto, o de la tarea, para disminuir los riesgos a niveles aceptables (Plantard et al., 2017).

A través del "Marco Estratégico de la UE en Materia de Salud y Seguridad en el Trabajo 2014 -2020", la Unión Europea (UE) está trabajando por anticiparse a los nuevos riesgos y emergentes derivados de las innovaciones técnicas asociadas a la evolución social para garantizar un control permanente de las condiciones laborales, buscando así disminuir la alta siniestralidad de la población laboralmente activa. El uso de las nuevas tecnologías para la investigación, y práctica de Factores Humanos/Ergonomía (FH/E), se están introduciendo y explorando para enfrentar nuevos desafíos derivados de un entorno tecnológico cada vez más complejo. Las nuevas tecnologías ofrecen nuevas oportunidades para la investigación y la práctica de FH/E que fueron difíciles de imaginar a principios del siglo XX (Lin et al., 2018). Recientemente se han empleado métodos de observación en ergonomía con retroalimentación en tiempo real basada en sistemas de captura de movimiento que influyen positivamente en el movimiento de los trabajadores y disminuyen los valores de riesgo ergonómico (Vignais et al., 2013; Battini et al., 2014), pero estos métodos están basados en sensores de inercia portátiles, que aumentan su aplicación en entornos reales de trabajo.

Otros sistemas de captura de movimiento, tales como los sistemas ópticos o magnéticos, tienen limitaciones similares que requieren sensores de posición o marcadores en el cuerpo que calibran el sistema con el esqueleto, lo que no siempre es posible en entornos reales de trabajo, ya que los sensores pueden ser incompatibles con las restricciones de seguridad y también pueden ser perturbados por el entorno electromagnético (Plantard et al., 2017).

La investigación de FH/E, realizada en campo o en laboratorio, actualmente se basa en gran medida en tecnologías interactivas, como por ejemplo el uso de Electroencefalografía (EEG), Técnicas de Rastreo del Comportamiento Humano, medidas fisiológicas automatizadas, sistemas portátiles de Realidad Virtual (RV), o sensores de profundidad entre otros. En la aplicación de estas nuevas técnicas subyacen la mayoría de las mediciones fisiológicas, biomecánicas y psicológicas tradicionales: frecuencia cardíaca, consumo de oxígeno, fuerza, peso, ángulos, temperatura, y actividad muscular. Sin embargo, gracias a avances tecnológicos recientes, la capacidad para realizar estas mediciones se ha vuelto portátil, más precisa y ha permitido almacenar o procesar un número mayor de datos que en el pasado. Se han desarrollado nuevas herramientas capaces de rastrear y registrar los estados de objetos y partes del cuerpo humano en el espacio, con tasas de muestreo capaces de procesar los datos en tiempo real. En algunos casos las nuevas tecnologías creadas para fines distintos a la investigación o aplicación en FH/E han sido empleadas por investigadores y profesionales en el ámbito de la ergonomía (Chiappe et al., 2013; Dutta, 2012). Entre los nuevos sistemas el más destacado se encuentra en los sistemas de captura de movimiento sin marcadores como los sensores RGB-D (Lin et al., 2018). Inicialmente diseñado para su uso en video juegos, este tipo de dispositivos de captura de movimiento de coste bajo y fácil uso se han aplicado ya en el análisis clínico de la marcha (Auvinet et al., 2012; Galna et al., 2014), las interacciones hombre-máquina (Wang et al., 2013), análisis del lenguaje de señas (Gameiro et al., 2014; Pedersoli et al., 2014), entrenamiento deportivo (Cassola et al., 2014) y ergonomía (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014; Patrizi et al., 2015; Marinello et al., 2015; Plantard et al.,2017) entre otros. El doctorando ha identificado con el análisis de los antecedentes descritos que se requieren estudios de investigación aplicada que den respuesta a las necesidades de la ergonomía ocupacional con dispositivos tecnológicos que se ajusten a los desafíos de los últimos tiempos (Schelvis et al., 2015; Hasan et al., 2015).

Esta TD inicialmente identificará los métodos de evaluación observacional más aplicados por los profesionales. Posteriormente se determinarán los dispositivos tecnológicos aplicables en el ámbito de las metodologías observacionales de la ergonomía ocupacional orientados a lograr el rastreo de la actividad humana en diferentes actividades. Como

resultado del análisis anterior, se ha considerado aplicar dos dispositivos tecnológicos: el primer dispositivo pretende la optimización de los espacios de un entorno laboral real mediante el empleo de sensores de profundidad RGB-D y Algoritmos Genéticos (AGs), considerando múltiples criterios ergonómicos para distribuir las áreas de trabajo mediante el empleo de los sensores de profundidad. Este sistema presenta dos cualidades fundamentales: el bajo coste de implementación y mantenimiento, y la automatización (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014). La otra herramienta tecnológica aplicada es sensores Eye-Tracking (rastreo ocular) como una técnica particularmente relevante para la mejora de interfaces de usuario en las Pantallas de Visualización de Datos (PVDs) y analizar la carga de trabajo mental durante la ejecución de las tareas. Estas técnicas, que han sido previamente estudiadas para analizar interacciones entre los usuarios y los PVDs se emplearán con el fin de mejorar el diseño de las interfaces presentadas en PVDs, y así lograr disminuir los tiempos de respuesta ante las tareas que puedan ser causantes de riesgo ergonómico (Karn et al., 1999; Martin et al., 2011; Stainer et al., 2013; Starke et al., 2015).

De modo general, esta tesis pretende responder a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los métodos de evaluación ergonómica y diseño de puestos de trabajo más comúnmente empleados?
- ¿Cuál es el grado de utilidad percibida por los expertos de dichos métodos y en qué es posible mejorarlos?
- ¿En cuáles de dichas técnicas es posible la incorporación de nuevas tecnologías como apoyo a su aplicación?
- ¿Supone la aplicación de nuevas tecnologías en los métodos de evaluación y rediseño ergonómico de puestos de trabajo una mejora en su aplicabilidad y resultados?

1.2. HIPÓTESIS DE LA TESIS DOCTORAL

Como respuesta a los problemas anteriormente identificados, se plantean las siguientes hipótesis:

1. Son muchos los métodos de evaluación ergonómica utilizados en la práctica habitual de la ergonomía ocupacional. Un gran número ha sido científicamente validado para identificar factores de riesgo ergonómico. Sin embargo, no todos presentan el mismo grado de usabilidad ni son empleados en la misma medida en la práctica real en entornos de trabajo.
2. Se podría disminuir el nivel de los factores de riesgo ergonómico de la tarea desarrollada con el uso de las nuevas tecnologías orientadas al ser humano para el rediseño de los puestos de trabajo en diferentes sectores industriales.
3. El empleo de los sensores de profundidad (RGB-D) para el rediseño de los espacios de trabajo puede mejorar las condiciones ergonómicas en los puestos de trabajo para diferentes sistemas de producción.
4. El empleo de Eye-Tracking (rastreo ocular) permite obtener configuraciones de PVDs que aumenten la eficiencia y la seguridad para el trabajador.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

El objetivo general de esta TD es desarrollar aplicaciones de nuevos dispositivos tecnológicos (sensores RGB-D y sistemas de rastreo ocular Eye-Tracking) para la evaluación y el diseño ergonómico de puestos de trabajo.

Para ello se persigue identificar las metodologías más empleadas por los ergónomos para la detección de factores de riesgo ergonómico y, dentro de ellas, aquellas en las que el empleo de las dos técnicas mencionadas pueda suponer una mejora en su aplicabilidad y resultados. Una vez identificadas, se abordará el desarrollo e implementación de los procedimientos que permitan el empleo de las nuevas tecnologías en dichas metodologías de evaluación de riesgo ergonómico.

1.3.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, se han de alcanzar previamente una serie de objetivos específicos listados a continuación:

- Analizar los métodos habitualmente empleados por los ergónomos en el análisis y la mejora ergonómica de puestos de trabajo, para establecer en cuáles es posible introducir nuevas tecnologías.
- Identificar los dispositivos tecnológicos orientados al rastreo de la actividad humana aplicables en el ámbito de las metodologías de la ergonomía ocupacional.
- Desarrollar técnicas y procedimientos para el empleo de los dispositivos tecnológicos identificados en los métodos de evaluación y diseño ergonómico de puestos de trabajo.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Esta TD se presenta bajo la modalidad de compendio de artículos (en concreto tres artículos), por lo que la estructura de los capítulos recopila los contenidos de cada uno de ellos. Cada uno de los artículos puede ser leído independientemente al contener los aspectos necesarios para su comprensión, pero la unión de todos ellos constituye un solo trabajo con un hilo argumental. Esta TD se estructura en 8 capítulos, y los anexos, que se exponen a continuación:

En el Capítulo 1 se realiza la introducción y planteamiento del problema de la TD, la presentación de las hipótesis, la exposición de los objetivos planteados para la investigación y posteriormente se detalla la estructura que siguen los artículos, así como su impacto en la consecución de los objetivos planteados.

En el Capítulo 2 se presentan los antecedentes de la temática de interés y el marco teórico en el que se desarrolla la TD. En este capítulo se muestra el estado del arte de las nuevas tecnologías orientadas al ser humano, y cómo estas son usadas en la actualidad en entornos laborales, profundizando especialmente en los sensores RGB-D y el Eye-Tracking (rastreo ocular).

Los Capítulos 3, 4 y 5 recogen tres artículos publicados en revistas científicas indexadas en el primer cuartil de su categoría en el Journal Citation Report, formando el cuerpo principal de la TD que se ha desarrollado para dar respuesta a los objetivos y validar las hipótesis planteadas.

El Capítulo 3 presenta el primer artículo titulado "**Influencias en el uso de métodos observacionales por parte de los profesionales a la hora de identificar factores de riesgo en el trabajo físico**". Este artículo se publicó en la revista Ergonomics en el año 2015, revista que en el año de la publicación estaba indexada en el primer cuartil de su categoría, con un factor de impacto de 1,85.

Resumen extendido del primer artículo

Influencias en el uso de métodos observacionales por parte de los profesionales a la hora de identificar factores de riesgo en el trabajo físico:

En este primer artículo se determinó cuáles son los problemas más comunes a los que se enfrentan los evaluadores al aplicar métodos de evaluación de puestos de trabajo y en qué medida perciben problemas en cada método. Posteriormente se trató de correlacionar los problemas percibidos con la utilidad global que los profesionales perciben en cada método observacional. Para lograr el objetivo

principal fue necesario alcanzar primero un objetivo secundario: conocer el perfil demográfico y formativo del profesional, no necesariamente certificado, que hace uso de los métodos observacionales de evaluación ergonómica, identificando cuáles emplea y con qué frecuencia.

En el Capítulo 4 se presenta el artículo titulado "**Uso de sensores RGB-D y algoritmos genéticos para la optimización de diseños en puestos de trabajo**". Este artículo fue publicado en la revista Applied Ergonomics en 2017, revista que en el año de la publicación estaba indexada en el primer cuartil de su categoría con factor de impacto de 0,875.

Resumen extendido del segundo artículo

Uso de sensores RGB-D y algoritmos genéticos para la optimización de diseños en puestos de trabajo:

En esta investigación se presenta el empleo de sensores RGB-D y Algoritmos Genéticos (AGs) para reorganizar automáticamente las áreas de trabajo optimizando los enfoques de los elementos situados en dichas áreas y los movimientos del trabajador. El método desarrollado permite obtener de forma automatizada el diseño óptimo de los elementos presentes en el plano de trabajo. Para obtener el mejor diseño, un sensor RGB-D detecta los movimientos de las manos del trabajador al alcanzar objetos durante el desarrollo de su tarea. Los datos obtenidos por el sensor durante un cierto periodo de tiempo son empleados por un AG para obtener un nuevo diseño con base en los criterios ergonómicos y productivos que establezca el diseñador. El AG considera, además, las restricciones geométricas impuestas por las dimensiones del plano de trabajo y de los elementos a distribuir sobre él. El método es idóneo para puestos de trabajo de montaje, puestos de trabajo de oficina, puestos de empaquetado de productos, puestos de trabajo de supermercado donde se chequea de pie o a cualquier puesto en el que la actividad del trabajador se desarrolla sobre un plano de trabajo y en un área limitada. Ésta es una aplicación adecuada para los sensores RGB-D dadas sus actuales limitaciones. Únicamente es necesario detectar la posición de las manos del trabajador, por lo que la obstrucción puede ser evitada colocando correctamente el sensor, donde el trabajador permanezca todo el tiempo en el campo de visión y esté situado de frente al sensor.

En el Capítulo 5 se presenta el artículo titulado "**Optimización del diseño de las interfaces de usuario mediante el rastreo ocular, movimientos del ratón y algoritmos genéticos**". Este artículo fue publicado en la revista Applied Ergonomics en julio de 2019, revista que en

el año de la publicación está indexada en el primer cuartil de su categoría con factor de impacto de 1,071.

Resumen extendido del tercer artículo

Optimización del diseño de las interfaces de usuario mediante el rastreo ocular, movimientos del ratón y algoritmos genéticos:

Este tercer artículo presenta un método automatizado para establecer la mejor configuración de paneles de control o interfaces de usuario generadas por el ordenador que incluyan gran cantidad de controles e indicadores. Otros métodos han sido desarrollados para organizar los elementos de interfaz, ofreciendo sólo resultados conceptuales que se deben ajustar manualmente para obtener un diseño válido en entornos reales. Basados en estas consideraciones, en este trabajo se propuso un nuevo procedimiento automatizado para obtener el diseño óptimo de interfaces basadas en un software. Se realizó un rastreo de la mirada de los usuarios (rastreo ocular) durante el uso de la interfaz, así como de los movimientos del ratón (rastreo del ratón). Dicha información es empleada para obtener la mejor configuración de estos elementos. Las soluciones son generadas empleando un AG basado en árbol de cortes. Este AG es capaz de obtener configuraciones idóneas que respetan las restricciones geométricas de los elementos en la interfaz. Los resultados muestran que este procedimiento incrementa la efectividad, la eficiencia y la satisfacción de los usuarios cuando interactúan con las interfaces obtenidas.

El Capítulo 6 muestra una discusión general acerca de los principales resultados presentados en los capítulos 3, 4 y 5.

El Capítulo 7 presenta la contrastación de las hipótesis frente al cumplimiento de los objetivos planteados con las aportaciones realizadas, y las líneas de investigación futuras respecto a tecnologías orientadas al ser humano para los entornos laborales.

El Capítulo 8 muestra las principales referencias bibliográficas empleadas en la Tesis Doctoral.

Finalmente, se presentan 5 anexos correspondientes a una lista de verificación empleada en la investigación desarrollada en el primer artículo, los resultados de la sesión del experimento del tercer artículo, así como, los 3 artículos que componen la TD en la versión de publicación.

CAPÍTULO II. – MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES

2.1. MARCO TEORICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos, así como la revisión del estado del arte sobre los que se fundamenta esta TD.

2.1.1. La Ergonomía

Etimológicamente la palabra ergonomía procede de la palabra griega “ergos”, cuyo significado es trabajo, actividad, y “nomos” que significa principios, leyes (Ferrer, 1997). La Ergonomía se define como "la disciplina científica relativa a la comprensión de las interacciones entre humanos y otros elementos de un sistema, y la profesión que aplica teoría, principios, datos y métodos para diseñar; con el fin, de optimizar el bienestar humano y rendimiento general del sistema" (IEA, 2000); La Asociación Española de Ergonomía (AEE), creada en 1964, define Ergonomía como: "Conjunto de conocimientos de carácter multidisciplinar aplicados para la adecuación de los productos, sistemas y entornos artificiales a las necesidades, limitaciones y características de sus usuarios, optimizando la eficacia, seguridad y bienestar" (AEE, 2018). Otras definiciones de ergonomía dicen que es: "la comprensión teórica y fundamental del comportamiento humano y el rendimiento en sistemas socio-técnicos con interacción intencionada, y la aplicación de esa comprensión al diseño de interacciones en el contexto de entornos reales". La primera parte de la definición hace referencia al comportamiento y el rendimiento humano, que ha sido indiscutiblemente fundamental para la ergonomía desde el comienzo de la disciplina. (Wilson, 2012; Dempsey, 2018).

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se consideraba que las personas debían adaptarse al trabajo. Con este criterio surgió el Taylorismo que consiste en un enfoque basado en la organización científica del trabajo. Posteriormente, con la Segunda Guerra Mundial, y con la finalidad de mejorar la productividad laboral, nació en Estados Unidos la llamada "Human Engineering" (ingeniería humana), que se ocupó de diseñar e instalar tecnología según las aptitudes y limitaciones de las personas para realizar su trabajo. En la misma época, hacia mediados del siglo XX, y con la misma finalidad (basada en aumentar la productividad, pero todavía sin tener en cuenta criterios de bienestar social), se creó en Inglaterra la ergonomía, cuyo planteamiento general consistía en adaptar el trabajo a la persona. Actualmente, en Europa, la ergonomía está ampliamente representada en todas las ciencias con las que se interrelacionan. Además, con su desarrollo se ha presentado el trabajo de campo y son objeto de estudio las personas con relación no sólo al trabajo sino también con las actividades que realizan diariamente. Por tanto, aunque su origen se sitúa en el ámbito del trabajo, su campo de actuación se ha presentado, siendo su objetivo final llegar a conseguir una efectividad funcional óptima de cualquier equipo, instrumento o

ayuda física que utilicen las personas independientemente de la actividad que estén llevando a cabo. En resumen, la ergonomía no sólo se relaciona con el trabajo, sino que hablamos ya de una ergonomía de la actividad. El término ergonomía se utiliza para referirnos a toda actividad, sea o no laboral, que desarrolla el ser humano (Martínez-González et al., 2001).

Centrándonos en el ámbito laboral, la ergonomía es un sistema de trabajo que comprende a uno o más trabajadores y al equipo de trabajo, conjuntamente actuando para desarrollar la función del sistema en un lugar de trabajo, en un entorno de trabajo y bajo las condiciones impuestas por las tareas de trabajo (ISO 26800:2011). La Ergonomía tiene en consideración factores físicos, cognitivos, sociales, organizacionales y ambientales, pero con un enfoque “holístico” en el que cada uno de estos factores no deben ser aisladamente analizados sino en conjunto por la interacción que existe entre ellos.

Por lo tanto, FH/E tiene como objetivo mejorar la eficacia, y la eficiencia del trabajo, así como la mejora de la seguridad, la reducción de la fatiga, el estrés y lograr así una mejor calidad de vida (Sanders and McCormick, 1993). Para lograr estos resultados, varios académicos han argumentado que debe haber una transferencia de conocimiento y sinergia entre la investigación y la práctica de FH/E (Caple, 2008; Meister, 1999; Salas, 2008; Sind-Prunier, 1996; Singleton, 1994). Sin embargo, las discusiones en la literatura de FH/E en los últimos 50 años muestran un gran distanciamiento en la relación entre la investigación y la práctica, lo que puede disminuir la utilidad de la investigación y la efectividad de la práctica en esta disciplina (Chung and Williamson; 2017).

2.1.2. Métodos de Evaluación habitualmente empleados en ergonomía

En la actualidad, existen un gran número de métodos de evaluación enfocados a apoyar al ergónomo en la tarea de identificación de los diferentes riesgos ergonómicos en los puestos de trabajo (levantamiento de cargas, carga postural, movimientos repetitivos, factores psicosociales, etc.). Además, los métodos más difundidos han dado lugar a numerosas herramientas informáticas con el objetivo de facilitar su aplicación. La selección del método adecuado para medir cada tipo de riesgo, así como la garantía de fidelidad a la fuente de la herramienta o documentación utilizada, se ha identificado como un problema importante al que se enfrentan los ergónomos a la hora de iniciar un estudio ergonómico (Asensio-Cuesta et al., 2012).

Los métodos de evaluación ergonómica de puestos de trabajo pueden clasificarse en tres grupos: Los Métodos de Auto-informe, los Métodos Observacionales y los Métodos de Medición Directa (Guelaud et al., 77). Los Métodos de Auto-informe se aplican de

diferentes formas tales como escalas de calificación, cuestionarios, listas de verificación o entrevistas; sin embargo, no siempre son confiables y pueden llevar a una interpretación sesgada que depende de la experiencia del profesional que ha sido asignado para el levantamiento de la información (Burdorf and Laan, 1991; Wiktorin et al., 1993).

Los Métodos Observacionales consisten en observar directamente al trabajador durante el desarrollo de su tarea tomando los datos necesarios para la evaluación. Para evaluar el riesgo asociado a la adopción de Posturas Forzadas destacan el Método POSTURE TARGETTING centrado en la evaluación de posturas estáticas (Corlett et al., 79); el Método OWAS que analiza las posturas de todo el cuerpo considera 252 posiciones diferentes como resultado de las posibles combinaciones para la posición de espalda, brazos y piernas (Karhu et al., 77); el Método RULA (McAtamney et al., 93; Asencio-Cuesta et al., 2012) que realiza la valoración rápida de miembros superiores para priorizar los trabajos que deberían ser investigados, teniendo en cuenta la magnitud de la carga postural, la fuerza y la actividad muscular, indicando al evaluador los aspectos donde pueden encontrarse los problemas ergonómicos del puesto, y por tanto, realizar las recomendaciones adecuadas de mejora; el Método REBA (Hignett et al., 00) basado en el método RULA, que presenta la evaluación a los miembros inferiores; el Método HAMA (Hand-Arm-Movement Analysis) (Christmansson, 94) que se centra en la evaluación de los miembros superiores; el Método PLIBEL (Kemmlert et al., 87) que identifica riesgos en diferentes partes del cuerpo, y la Evaluación Postural Rápida (EPR) que es una herramienta que permite realizar una primera y somera valoración de las posturas adoptadas por el trabajador a lo largo de la jornada.

Los métodos de valoración del Manejo de Cargas habitualmente empleados son: la Ecuación de NIOSH (Waters et al., 93), Tablas de Snook y Ciriello (Snook et al., 91) y la guía de levantamiento de cargas del INSHT. El rastreo de Movimientos Repetitivos generalmente se realiza con el Método JSI (Job Strain Index) para la evaluación de los riesgos debidos a movimientos repetitivos en las manos/muñeca (Moore et al., 95); el Método OCRA, que se centra en la repercusión de la repetitividad en los miembros superiores del cuerpo y, por último, el Método Sue Rodgers que permite evaluar la fatiga muscular debido a la interacción entre el nivel de esfuerzo, la duración del esfuerzo y la frecuencia de activación de los músculos por minuto para cada grupo muscular (Colombini et al., 02; Rodgers, 86; Rodgers, 92). Entre las propuestas para el análisis del riesgo de múltiples factores consolidados se encuentra el Método LEST (Laboratoire de Economie et Sociologie du Travail) (Guelaud et al., 77), o métodos tales como FAGOR (FAGOR, 87), RENUR o RENAUL (Regie Nationale Des Usines Renault (Boulogne-Billancourt) Conditions De Travail (Service, 76), ANACT (Piotet et al., 84) y Método EWA (Ergonomic Workplace Analysis) (Ahonen et al., 89); dichos métodos permiten evaluar las condiciones de trabajo

de forma global, es decir, analizan tanto factores de riesgo físicos, como ambientales y psicosociales. Si bien dichos métodos suponen aportaciones importantes al problema de la valoración global de los riesgos asociados a los TMEs, hasta el momento persiste el problema de la escasez de estudios científicos que determinen la interacción entre los factores de riesgo y su importancia relativa (Li et al., 99; Asensio-Cuesta et al., 2012).

Finalmente, los Métodos de Medición Directa (MD) consisten en recopilar datos directamente de sensores conectados al cuerpo del trabajador. Estos métodos son difíciles de implementar en entornos reales de trabajo (Li and Buckle, 1999), ya que estos dispositivos pueden causar incomodidad e influir en el comportamiento del trabajador (David, 2005). Esto conduce a una baja precisión y una alta variabilidad en las observaciones (Burdorf et al., 1992), lo que supone un problema importante dado que la precisión y la validez de los resultados obtenidos por los métodos de observación dependen directamente de la información de entrada recopilada (Diego-Mas 2015; Fagarasanu and Kumar, 2002).

2.1.3. Tecnologías Orientadas al Ser Humano

En esta TD denominamos Tecnologías Orientadas al Ser Humano a aquellas tecnologías cuyo propósito es la medición del comportamiento o la interacción con el ser humano con la mínima invasión de su actividad.

La mayoría de las disciplinas científicas, la investigación y la práctica en el campo de FH/E comenzó con observaciones a simple vista, grabaciones y análisis realizadas con cronómetro, lápiz y papel. Los entornos de trabajo, y de vida, han experimentado rápidos cambios tecnológicos. Las nuevas tecnologías se están introduciendo y explotando para enfrentar los nuevos desafíos derivados de un entorno tecnológico cada vez más complejo. Estas tecnologías han sido en gran parte el resultado de la revolución digital tanto en software como en hardware. Por ejemplo, el tamaño de los equipos de cómputo ha disminuido significativamente en los últimos 30 años, desde máquinas de mainframes hasta ordenadores personales, laptops, tabletas y teléfonos inteligentes. Las nuevas tecnologías orientadas al ser humano brindan oportunidades para la investigación y la práctica de FH/E que nunca podrían imaginarse a principios del siglo XX. La investigación ahora depende en gran medida de nuevas tecnologías interactivas. Sin embargo, varios de los principios fundamentales que subyacen en la mayoría de las mediciones fisiológicas, biomecánicas y psicológicas siguen siendo los mismos: dependencia de la frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno, la fuerza, el peso, los ángulos, la temperatura, la electromiografía, etc., para obtener nuevos conocimientos sobre la capacidad, esfuerzo, comodidad y rendimiento del cuerpo humano.

Haciendo una revisión de las últimas tecnologías orientadas al ser humano empleadas en la actualidad podemos destacar, por ejemplo, el EEG (electroencefalografía), los dispositivos portátiles comúnmente denominados wearables, la realidad virtual, la realidad aumentada y los sensores de RGB-D entre otros. Los recientes desarrollos en el mercado de dispositivos inteligentes comprenden los teléfonos inteligentes, tabletas y phablets, implementando sensores tales como acelerómetros triaxiales, giroscopios, magnetómetros o altímetros.

Los avances tecnológicos recientes, y la capacidad para realizar mediciones de manera portátil ha permitido almacenar y/o procesar un número importante de datos operativos de larga duración con mayor precisión, logrando nuevas herramientas para rastrear y registrar los estados de más objetos ambientales y partes del cuerpo humano en el espacio, para crear entornos virtuales e incluso para procesar datos en tiempo real con mayores tasas de muestreo. En algunos casos, las nuevas tecnologías creadas para fines distintos de la investigación o aplicación FH/E han sido empleadas por investigadores y profesionales para sus propios fines (Chiappe et al., 2013; Dutta, 2012). La disciplina FH/E sólo está comenzando a explotar todo el alcance y la potencia de estos desarrollos tecnológicos que expondremos a continuación (Lin et al., 2018).

La Electroencefalografía (EEG) es un método de medición de la actividad cerebral que puede capturar y registrar la actividad bioeléctrica cerebral. Ésta detecta la diferencia de voltaje existente entre ciertos puntos del cráneo humano (Teplan, 2002). La medición con el EEG requiere de electrodos (Jurcak et al., 2007) manualmente colocados por un experto sobre el cráneo del individuo. Dicha colocación se realiza identificando cuatro puntos anatómicos: el Nasión (Na), el Inión (I), el punto pre articular izquierdo (LPA) y el punto pre articular derecho (RPA) (Jurcak et al., 2018); posteriormente se mide la distancia superficial para la curva que va de Na a I a través de la curva pre articular izquierda, los primeros 10-20 puntos en esta curva se colocan a un incremento del 10% de la distancia medida desde los puntos inicial y final (Nasión e Inión), los puntos intermedios se incrementan al 20% y se realiza el mismo método en el otro hemisferio de la cabeza. El plano sagital medio se determina de manera similar para encontrar los puntos de referencia de la línea central, marcando un total de 10-20 puntos. En la actualidad, se han derivado sistemas de colocación de electrodos alternativos del sistema 10-20 para mejorar la resolución espacial, es decir el sistema 10-10, en el que todos los electrodos se colocan incrementando el 10%, y el sistema 10-5 en el que se colocan entre el 10% y el 5% de la distancia en lugar del 20% y 10%. Los tipos de electrodos más usados son Ag/AgCl en combinación con un gel conductor para transmitir la información entre el electrodo y el cuero cabelludo del usuario (Teplan, 2002).

Los sensores de profundidad (RGB-D) también son empleados en la investigación y práctica de FH/E. Los sensores de profundidad pueden detectar las distancias de los objetos colocados en frente del sensor en función de un patrón de luz infrarroja reflejada. En 2010, Microsoft lanzó la primera generación del sensor Kinect, que es esencialmente una combinación de un sensor de profundidad y una videocámara, para su consola de video juegos Xbox. Desde entonces, los sensores de profundidad se volvieron accesibles a nivel comercial. Con el kit de desarrollo del software lanzado, junto con el sensor Kinect, se han llevado a cabo varias investigaciones en el área de la ergonomía (Dutta, 2012; Lin., et al, 2018). Este kit de desarrollo permite detectar las posiciones de las articulaciones de las personas presentes en la escena con precisión y sin la necesidad de marcadores ni calibración del sistema.

La Realidad Virtual (RV) y la Realidad Aumentada (RA) son tecnologías digitales que permiten simular situaciones en un entorno generado por un ordenador, donde los usuarios actúan en un ambiente simulado en tiempo real, el cual fue creado artificialmente a través de una interfaz que estimula uno o más sentidos (Innocenti, 2017). Las tecnologías que aplican la RV son para dos tipos de ambientes que se diferencian por el grado de inmersión de los usuarios. El primer tipo son ambientes virtuales de baja inmersión (LIVE) que se basan en entornos o mundos virtuales, en los que los usuarios interactúan entre sí con modelos digitales o avatares (representación del usuario virtual). El segundo tipo son entornos virtuales de alta inmersión (HIVE) que emplean pantallas especializadas "Cave Automatic" (CAVE) (Merchant et al, 2014) o un dispositivo en forma de gafas que muestran múltiples imágenes proyectadas, tales como los modelos Oculus Rift, Samsung Gear VR, Google Cardboard, o dispositivos mixtos tales como Microsoft Holographic u HoloLens entre otros. Como complemento a estos dispositivos se pueden utilizar los guantes o controladores táctiles y los body trackers, que son trajes de captura de movimiento. Con todo esto se permite a los usuarios interactuar, moverse, mirar y estar inmerso en un entorno 3D en tiempo real (Rheingold, 1991; Benford et al., 2009; Innocenti, 2017). La RA combina elementos reales y virtuales, siendo interactiva en tiempo real y registrada en 3D. Los dispositivos de RA normalmente constan de unos cascos o gafas y un sistema de visualización para mostrar al usuario la información virtual que se añade a la real. El "headset" lleva incorporados sistemas de localización y rastreo, necesarios para poder localizar con precisión la situación del usuario. Los dos principales sistemas de visualización empleados son la pantalla óptica transparente y la pantalla de mezcla de imágenes; al igual que en los sistemas RV, usan imágenes virtuales que se muestran al usuario mezcladas con entornos reales o bien proyectadas directamente en la pantalla.

2.1.4. Uso de Tecnologías en entornos laborales desarrolladas en la TD

Posterior al análisis de las nuevas tecnologías orientadas al ser humano generalmente aplicadas a la Ergonomía se expondrán con más detalle dos dispositivos tecnológicos que se han empleado en esta TD.

2.1.4.1. Los Sensores RGB-D

Inicialmente, los sensores RGB-D fueron desarrollados para su uso en video juegos como un dispositivo para reconocer los movimientos naturales de las personas, los gestos y los comandos de voz (Dutta, 2012).




Los sensores de profundidad son conocidos por diversos nombres tales como Flash Lidar, time-of-flight camera, ranging camera, range sensors. En este trabajo se les denominará sensores RGB-D por ser la denominación más empleada en la actualidad ya que pueden ser empleados como un sistema de captura de movimientos en 3D. Este sistema tiene un emisor láser infrarrojo que constantemente proyecta un patrón de puntos infrarrojos sobre la escena. Una cámara infrarroja recoge dicho patrón correlacionándolo con un patrón de referencia mediante un proceso de triangulación, obteniendo la distancia del sensor a cada pixel. Así, es posible obtener una nube de aproximadamente 30.000 puntos coloreados a unas 30 imágenes por segundo (fps) (Henry, 2012). La densidad de los puntos obtenidos permite el escaneo de objetos reales para la reconstrucción en 3D. Los datos obtenidos del sensor pueden ser empleados en aplicaciones software mediante el empleo de un kit desarrollado de software (SDK) (Microsoft USA). Además de los datos procedentes de la profundidad (depth data) y color (RGB-D data), el sensor ofrece información sobre la posición de las articulaciones de las personas presentes en la escena (Skeleton data) prácticamente en tiempo real. La estructura de estos datos permite construir un diseño con las coordenadas de la cadera (centro, izquierda y derecha), la columna vertebral, el hombro (centro, izquierda y derecha), la cabeza, los codos, las muñecas, las manos, las rodillas, los tobillos y los pies (Clark, 2012).

En el campo de la ergonomía las primeras investigaciones sobre los usos de los sensores RGB-D se centraron en analizar si la precisión de los datos obtenidos permitían emplearlos como dispositivos de captura de movimiento sin marcadores (Bonnechère et al., 2013; Clark et al., 2012; Destelle et al., 2014; Dutta, 2012; Fernández-Baena, et al., 2012; Obdrzálek et al., 2012; Pfister, 2014), concluyendo que la precisión de estos sensores es ligeramente inferior a las de los dispositivos más caros, pero lo suficientemente confiable para ser empleados.

2.1.4.2 Uso de Eye-Tracking (rastreo ocular)

El "Eye-Tracking" (rastreo ocular) es el proceso de medir el punto donde se fija la mirada o el movimiento del ojo en relación a la cabeza (Tien et al., 2014). El rastreo del ojo puede realizarse mediante tres diferentes métodos: El primero es mediante la colocación de sensores invasivos, como lentes de contacto con espejo incorporado o sensores de campo magnético. El segundo es mediante sensores no invasivos, que emplean luz infrarroja que se refleja en los ojos y se capta mediante una cámara de video o algún otro sensor óptico. Finalmente, la tercera categoría emplea electrodos colocados alrededor del ojo para detectar el movimiento. La señal eléctrica que se puede derivar del uso de dos pares de electrodos de contacto colocados en la piel alrededor del ojo se llama electrooculograma (EOG). Esta técnica permite medir los movimientos oculares sacádicos asociados con los cambios de la mirada y la detección de parpadeos.

El rastreo ocular puede registrar información de distintas variables: fijación ocular, movimientos sacádicos, rutas visuales, parpadeo y dilatación de la pupila, los cuales se explican en la Tabla 1:

Situación	Variable	Definición	Interpretación
	Fijación	Los ojos permanecen en una posición mantenida cierto tiempo para tomar información.	Fijaciones largas: Interés/comprensión. Fijaciones cortas: Desinterés/incomprensión.
	Sacádicos	Movimientos oculares rápidos que ocurren entre fijaciones	Sacádicos regresivos: confusión /incomprensión Sacádicos repentinas: Cambio de objetivo. Sacádicos largas: Cambio del centro de atención.
	Rutas visuales	Suma de las Fijaciones y Sacádicos	Rutas rápidas y directas: fluidez cognitiva Rutas lentas y erráticas: confusión / incomprensión.



	Parpadeo	Cierre y apertura rápida del párpado	Baja frecuencia de parpadeo: Mayor exigencia de atención. Alta frecuencia de parpadeo: Menor exigencia de atención.
	Dilatación de pupila	Cambios en el tamaño de la pupila.	Dilatación: Activación emocional.

Tabla 1. Variables medidas mediante rastreo ocular (elaboración propia)

La información obtenida por los sistemas de rastreo ocular es recogida por un software y gráficamente representada. Las representaciones pueden ser estáticas (camino o ruta sacádica, mapas de calor y mapas de zonas ciegas) o dinámicas (recorrido de la mirada).

Las representaciones animadas de un punto sobre la interfaz se utilizan cuando se examina individualmente el comportamiento visual, indicando dónde se ha fijado la mirada del individuo en cada momento, así como un pequeño rastreo en forma de línea que indica los movimientos sacádicos previos. Las representaciones estáticas del camino o ruta sacádica son similares a la anterior, simplemente que en este caso se trata de una representación estática, siendo ésta más difícil de interpretar. Los mapas de calor son una representación estática alternativa. En ésta, las zonas calientes o de mayor intensidad, señalan dónde coinciden las zonas de referencia viso-espacial con mayor frecuencia. Los mapas de zonas ciegas es una versión simplificada de los mapas anteriormente descritos, pero en este caso nos muestran las zonas que han sido visualmente menos atendidas por el usuario.

Los distintos tipos de dispositivos de rastreo ocular miden su posición respecto a diferentes sistemas de referencia. Si el dispositivo se monta en la cabeza, como un EOG (electrooculograma), entonces se miden los ángulos de los ojos, pero si en otros casos el sistema de medida se ubica en un banco, entonces se miden los ángulos de la mirada. Algunas investigaciones previas se han empleado para el diseño de interfaces de usuario, los patrones de recorrido de la mirada (las secuencias de las regiones de interés atendidas) y la duración de las fijaciones para identificar el diseño óptimo de las interfaces o la importancia percibida de los elementos individuales para los usuarios (Büch et al., 2009, Jacob and karn 2003, Poole and Ball, 2006).

Algunos de los softwares que permiten realizar el rastreo de los ojos son: iMotions, SMI Redn Professional, Eye Works, PyGaze, Optikey, Tobii EyeX, Gazepoint e Irisbond Primma. Cada uno de éstos cuenta con un software y un hardware, el cual puede requerir gafas,

dispositivos de rastreo ocular, cámaras y sensores. La herramienta empleada en este proyecto de investigación es Tobii EyeX.

2.1.4.3 Algoritmos Genéticos (AGs)

Aunque los AGs no son en sí mismos una tecnología orientada al ser humano, se han introducido en este apartado por ser una de las técnicas empleadas en la presente TD junto a los sensores RGB-D y el rastreo de la mirada (rastreo ocular). Los principios de los AGs fueron establecidos por Hollan y se encuentran descritos en los libros (Goldberg, 1989; Davis, 1991; Michalewicz, 1992; Reeves, 1993). Dentro de las técnicas de computación evolutiva, los AGs ocupan un lugar importante debido a varios motivos (Holland, 1975; Pérez, 04). Las ideas fundamentales del enfoque evolutivo están recogidas de una forma natural en dicha técnica. Son flexibles, adaptables a una gran cantidad de diferentes problemas pertenecientes a distintas áreas y permiten ser combinados con otras técnicas no necesariamente pertenecientes a la computación evolutiva (hibridación). Dentro de las técnicas de computación evolutiva, los AGs son los que poseen una mayor base teórica. Conservan una gran versatilidad pues son los que necesitan menos conocimiento específico del problema para su resolución. Es posible implementarlos en ordenadores con capacidades medias obteniendo resultados muy aceptables. Dentro de las técnicas metaheurísticas, los AGs son con diferencia los más empleados, existiendo multitud de estudios previos referidos a su empleo en parametrización e implementación, así como herramientas informáticas genéricas adaptables a diferentes problemas (Jones et al., 02; Whitley et al., 88; Grefenstette, 90; Smith et al., 91; Pérez, 04).

Los AGs están inicialmente definidos como métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y de optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos (Darwin, 1859). Los AGs se definen como: “métodos estocásticos de búsqueda ciega de soluciones cuasi-óptimas”. En ellos se mantiene una población que representa un conjunto de posibles soluciones que son sometidas a ciertas transformaciones con las que se trata de obtener nuevos candidatos, y a un proceso de selección sesgado en favor de los mejores candidatos. Mediante este proceso los AGs son capaces de ir creando soluciones cada vez más adaptadas a las condiciones del problema. Se dice que los AGs son métodos de búsqueda ciega debido a que éstos no disponen de más información del problema a resolver que aquella obtenida de la función objetivo empleada. Esta característica, junto con el hecho de que la búsqueda se realiza simultáneamente sobre un conjunto poblacional más o menos amplio, hacen de los AGs una técnica robusta de resolución de problemas. El proceso comienza, como en el resto de las técnicas de computación evolutiva, generando un conjunto de soluciones al problema de forma aleatoria. Cada una de estas soluciones está codificada mediante una cadena de

longitud finita (cuyo contenido es generalmente valores binarios) que la hace corresponder con un punto del dominio del problema. Estableciendo una analogía natural, dicha cadena sería un cromosoma y cada elemento de la cadena un gen. La transformación de los individuos de cada generación se lleva a cabo mediante la definición de una serie de operadores genéticos. Los más habituales son la selección, el cruce, y la mutación; aunque existen otros tipos y múltiples variantes de los anteriores (mutación no uniforme, mutación no estacionaria, cruces con adaptación, cruces solitarios y cruces anulares).

Mediante la aplicación de estos operadores sobre los cromosomas de diferentes miembros de la población es posible obtener individuos que hereden las características de sus predecesores. Para ello, se deberán escoger previamente los individuos que participarán de cada uno de los operadores genéticos y aquellos que sobrevivirán y pasarán a la siguiente generación. El mecanismo de muestreo empleado puede ser muy variado, yendo desde la selección directa de los mejores individuos (aquellos cuyos caracteres los hacen más adaptados al medio) a muestreos estocásticos de varios tipos (por sorteo, por ruleta, por torneos, por restos). El proceso se repite hasta que algún individuo alcance un valor prefijado del nivel de adaptación que el algoritmo converja o que simplemente el número de interacciones llegue hasta un valor determinado (Goldberg, 89; Rudolph, 94; Srinivas et al., 94).

2. 2. ANTECEDENTES

En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte relacionado con el campo de investigación de esta TD.

2.2.1. Métodos de Evaluación

Las investigaciones han mostrado que los métodos de evaluación validan la información de diferentes formas; una de éstas es según el grado de exactitud y precisión en la recopilación de datos, la técnica invasiva de medición para la labor que realiza el trabajador dependiendo del campo de aplicación o el nivel de entrenamiento que necesite el evaluador para llevarlo a cabo correctamente (Beek and Frings-Dresen, 1998; Li and Buckle, 1999; Malchaire, 2011; Wells et al., 1997). Los métodos basados en instrumentos o de medición directa son invasivos ya que emplean sensores ubicados en puntos específicos para evaluar variables que obtengan datos precisos, los cuales requieren una inversión en equipos, mantenimiento y personal técnico entrenado (David, 2005; Trask and Mathiassen, 2012). Los métodos directos han sido preferidos por los investigadores, pero no son adecuados para aplicar en entornos reales de trabajo (Li and Buckle, 1999).

Los métodos de observación directa en el puesto de trabajo usan sistemas de recogida de datos poco precisos y proporcionan resultados bastante amplios, aunque tienen la ventaja de ser fáciles de usar, aplicables a varios puestos de trabajo y apropiados para encuestar un gran número de sujetos a un coste bajo. Requieren un menor nivel de experiencia que otras técnicas y no requieren procesos de calibración. Estas técnicas parecen ser las más adecuadas según las necesidades de los profesionales de prevención de riesgos laborales que tienen tiempo y recursos limitados para establecer las prioridades de intervención (David, 2005; Genaidy et al., 1994). Aunque el empleo de métodos observacionales sea más simple que el de otro tipo de técnicas, los profesionales se enfrentan a varios problemas en su aplicación en entornos reales de trabajo, ya que deben ser capaces de seleccionar, aplicar y justificar el uso de uno o más métodos de evaluación. Algunos trabajos previos han abordado la utilidad y la clasificación de los métodos observacionales en función de criterios como la necesidad de instrumental adecuado, el nivel de entrenamiento requerido o el factor de riesgo evaluado (David, 2005; Li and Buckle, 1999; Malchaire, 2011; OHSCO, 2008; Takala et al., 2010) analizando para ello las características técnicas de cada método. Los resultados de estos estudios pueden servir de guía para la selección del método más adecuado según la actividad, pero no se establece una correlación entre dicha clasificación y el grado en el que los métodos son realmente empleados y cómo son percibidos por los profesionales. Estos trabajos previos han abordado el problema para conocer qué técnicas de medición observacional se usan mediante la realización de encuestas a ergónomos

profesionales certificados (Dempsey et al., 2005) o a miembros del comité de seguridad y salud (Pascual and Naqvi, 2008). La mayor parte de los encuestados respondían que usaban un determinado método porque lo encontraban el más apropiado para la tarea evaluada (Dempsey et al. 2005).

2.2.2. Sensores RGB-D

La tecnología de los sensores RGB-D no es nueva, ya existían dispositivos capaces de captar la profundidad de una escena desde finales del siglo XX. Sin embargo, dos características de los nuevos sensores RGB-D han provocado que su uso se haya extendido rápidamente y que sean empleados en áreas muy diferentes. Los nuevos sensores RGB-D tienen un coste muy reducido en comparación con los dispositivos más antiguos y pueden ser empleados como sistema de captura de movimiento en 3D, dado que el software que los controla proporciona información sobre la posición de las articulaciones de los usuarios presentes reconocidos en la escena (datos del esqueleto) en tiempo casi real. (Han et al., 2013).

Microsoft lanzó el sensor Kinect RGB-D en 2010 al mercado, mostrando que los sensores RGB-D tenía desarrollo en diferentes enfoques para los problemas habituales en varias áreas con el reconocimiento de objetos, la reconstrucción 3D, la realidad aumentada, el procesado de imágenes, la robótica, o la interacción hombre-máquina. En el campo de la ergonomía las primeras investigaciones sobre los usos de los sensores RGB-D se centraron en analizar si la precisión de los datos obtenidos permitían emplearlos como dispositivos de captura de movimiento sin sensores (Bonnechère et al., 2013a, 2013b; Clark et al., 2012, 2013; Destelle et al., 2014; Dutta, 2012; Fernández-Baena et al., 2012; Nixon et al., 2013; Obdržálek et al., 2012; Pfister et al., 2014). Los resultados de estos trabajos lograron concluir que la precisión de los sensores es sólo ligeramente inferior a la de los dispositivos de coste mayor, pero lo suficientemente confiable como para ser empleados para la evaluación postural.

Otras investigaciones se enfocaron en el empleo de los sensores RGB-D para técnicas de evaluación tradicionales de ergonomía tales como RULA (Haggag et al., 2013; Plantard et al., 2015), OWAS (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014) o la Ecuación de Levantamiento Manual de Cargas NIOSH (Patrizi et al., 2015; Spector et al., 2014). Incluso si los resultados de estas investigaciones son muy prometedores, y los sensores RGB-D pueden utilizarse como una herramienta para apoyar las tareas de los ergónomos, esta tecnología no está lo suficientemente desarrollada como para reemplazar a los expertos, y algunos aspectos necesitan más investigación para usar sensores RGB-D en entornos reales de trabajo. Estos dispositivos son un buen sistema de rastreo cuando el sujeto está frente al sensor o está en el rango de $\pm 40^\circ$, en otros casos, la fiabilidad de los datos disminuye significativamente

(Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014). La obstrucción y la auto-obstrucción son también problemas importantes. La posición de una articulación que no es visible por el sensor es inferida. Esta posición es calculada desde los datos de la articulación más cercana en la captura directa (NUI, 2013), disminuyendo drásticamente la confiabilidad de los datos. Estas situaciones son muy comunes en estudios de entornos reales de trabajo, donde el trabajador puede manejar objetos grandes que ocultan partes del cuerpo a la cámara, ya que podrían estar detrás de otro objeto o simplemente el trabajador podría moverse fuera del campo de visión del sensor. Algunas investigaciones, tratan de resolver este problema empleando múltiples sensores orientados en diferentes ángulos con relación al sujeto rastreado (Berger et al., 2013). Por otro lado, el rastreo del cuerpo puede no obtener con precisión los datos cinemáticos del cuerpo inferior (Yang et al., 2015) y las rotaciones de las articulaciones no se capturan correctamente o no se capturan en absoluto para los miembros periféricos o la cabeza. (NUI, 2013).

En 2014 Microsoft lanzó una versión mejorada de Kinect: Kinect v2. Esta versión tiene una mejor resolución para el sensor de profundidad, y su algoritmo de rastreo de las articulaciones-esqueleto (llamadas en esta versión cuerpo-rastreo de las articulaciones) es capaz de rastrear más articulaciones del cuerpo. La comparación entre ambos sensores desarrollados concluyó que la precisión de la identificación conjunta de la ubicación del centro sustancialmente no se mejora en Kinect v2, y por lo tanto, dado el estado actual de esta tecnología, el empleo de los sensores RGB-D en cualquier aplicación real debió considerar las limitaciones de estos dispositivos (Xu and McGorry 2015)

Estudios que inicialmente se encontraron han propuesto la aplicación de los sensores RGB-D con el método RULA directamente desde las imágenes de Kinect (Pierre et al., 2017) para capturar posturas corporales de modo que el error de medición introducido por un observador humano se puede minimizar. Los resultados de este estudio indicaron un acuerdo de moderado a sustancial entre la puntuación RULA basado en Kinect y las observaciones de los expertos (Manghisi et al., 2018), logrando con esta investigación la evaluación de RULA basada en Kinect donde compite con Jack Task Analysis Toolkit (Jack-TAT). Jack-TAT es un software comercialmente disponible que se utiliza para diseñar espacios de trabajo físicos y evaluar el rendimiento humano dentro de un entorno virtual 3D. Usando la observación de expertos como punto de referencia los resultados mostraron un mejor acuerdo para la puntuación máxima de RULA con Kinect que la puntuación de Jack-TAT (Lin et al., 2018).

En otra investigación se consideró el uso del sensor RGB-D aplicando el método RULA para medir continuamente el movimiento de la articulación del hombro durante el uso del

ordenador. Los datos de la cinemática de la articulación del hombro se han empleado como un indicador representativo de los estudios de ergonomía en oficina que se centran en el uso del teclado y el ratón. Los autores compararon la cinemática del hombro medida por un sensor RGB-D con las medidas tomadas en un sistema de captura de movimiento basado en laboratorio durante un uso normal del ordenador, incluyendo la escritura de texto y el click en los íconos. Los resultados de esta comparación mostraron que existe una buena concordancia entre los dos sistemas, pero la precisión de los sensores RGB-D en la cinemática del hombro disminuye, ya que se evidencia que los ángulos de elevación del brazo proporcionalmente se subestiman corrigiéndose mediante regresión (Lin et al., 2018; Xu et al., 2015). Estos resultados también mostraron que los sensores RGB-D son lo suficientemente precisos para tomar las posturas en un ambiente de trabajo con el método RULA Y OWAS (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014; Plantard et al., 2015) logrando un rastreo del esqueleto.

En Estados Unidos, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, ha creado la Ecuación de NIOSH para evaluar tareas en las que se realiza levantamientos de carga. El objetivo del estudio fue automatizar los parámetros revisados en NIOSH usando la cámara de profundidad (Microsoft Kinect) y la tecnología de algoritmos del esqueleto, obteniendo resultados significativos para la evaluación de entornos laborales con Levantamiento Manual de Cargas y con Levantamiento Estático, aunque se consideró trabajar en la optimización de los resultados (Patrizi et al., 2015; Spector et al., 2014).

2.2.3. Eye-Tracking (rastreo ocular)

Los estudios de los movimientos de los ojos inicialmente se realizaron mediante la observación directa en la década de los 1800. En 1879, en París, Louis Emile Javal observó que la lectura no implica un suave barrido de los ojos a lo largo del texto (como se creía) si no una serie de paradas cortas (llamadas fijaciones) y sacadas (movimientos rápidos). Estos antecedentes fueron explorados en 1900 para establecer en qué paradas se detienen los ojos, por cuánto tiempo y cuándo regresan a las palabras que ya han visto. El primer prototipo de seguidor de ojos lo creó Edmund Huey para estudiar y cuantificar regresiones (sólo una pequeña ratio de los movimientos sacádicos son regresiones) en una especie de lente de contacto con un agujero que se colocaba en los ojos del sujeto a rastrear. El objetivo estaba conectado a un puntero de aluminio que se movía en respuesta al movimiento del ojo para mostrar que algunas palabras en oraciones no son fijas. Entre 1900 y 1980 se aumentaron las investigaciones donde Just y Carpenter describieron la gran influencia del ojo y la mente, buscando así resolver la interacción hombre-máquina.

En entornos laborales se han venido realizando estudios de rastreo ocular que permiten capturar la actividad de un usuario y la toma de decisiones empleada en una sala de control (Moray and Rotenberg, 1989; Lin et al., 2003; Shepley et al., Moore and Gugerty, 2010) para el rastreo ocular, con el fin de detectar la fatiga del usuario y el deterioro de la vigilancia visual (McIntire et al., 2014; Moray and Rotenberg, 1989; Smith, 2004). Otros estudios muestran que se utilizó el rastreo ocular para estudiar los patrones de lectura de una política de privacidad. Este estudio se basa en la teoría del sesgo para la toma de decisiones, enmarcado en un comportamiento específico (Korobkin, 2016), donde el principal objetivo de este estudio fue examinar la atención y respuesta a la personalización de publicidad bajo dos niveles de demanda cognitiva. Para examinar estas relaciones el estudio utilizó dos opciones (tipo de anuncio: personalizado vs. no-personalizado, y demanda cognitiva de tareas: alta vs. baja) con un experimento factorial entre sujetos. El experimento se realizó en un laboratorio de investigación que contenía un ordenador de sobremesa con un eye-tracking Tobii X2-60 montado en el dispositivo y un puesto separado para el investigador (Banga and Wojdyski, 2016); si bien la investigación anterior se centró en las declaraciones de los usuarios con respecto a las políticas de lectura o en las elecciones hechas por los usuarios de contextos en línea, este estudio utiliza la metodología de rastreo ocular para realmente aprender cómo se están leyendo estas políticas (Nili, 2016).

CAPÍTULO III. - ARTICULO I

3.1. Influencias en el uso de métodos observacionales por parte de los profesionales a la hora de identificar factores de riesgo en el trabajo físico.

Se presenta a continuación el primer artículo que forma parte del compendio de artículos de esta TD, junto con la referencia completa adaptada al formato de la tesis. El artículo fue publicado en la revista Ergonomics, volumen 58, número 10, páginas 1660 - 70, el 7 de abril de 2015. En el año de la publicación, la revista estaba clasificada dentro del primer cuartil de su categoría, con un factor de impacto de 1,85.

<https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1023851>

3.1.1. Resumen

La mayoría de métodos observacionales para evaluaciones de riesgo de Trastornos Músculo Esqueléticos han sido desarrollados por investigadores para ser aplicados en entornos específicos, y los profesionales pueden encontrar dificultades al usarlos en entornos reales de trabajo. El objetivo principal de este estudio fue identificar los factores que influyen en el grado de utilidad percibido por los profesionales de las técnicas observacionales, y el grado en que éstos afectan su percepción. Se realizó una encuesta a los profesionales sobre los factores a los problemas que normalmente se encuentran cuando emplean métodos, así como la utilidad general percibida sobre las mismas. Los resultados muestran que los profesionales le dan importancia particular al apoyo que los métodos proporcionan para la toma de decisiones en cuanto a cambios en los sistemas de trabajo, y cómo de aplicables son para diferentes tipos de actividades. Los resultados de este estudio pueden servir como guía a los investigadores para el desarrollo de nuevas técnicas de evaluación más útiles y aplicables en entornos.

Resumen para el profesional: Se realizó una encuesta entre los profesionales acerca de la utilización de métodos de evaluación ergonómica para identificar factores de riesgo en trabajos físicos. Se analizaron las razones para calificar un método más o menos útil. Éstas fueron: el apoyo que suministran los métodos a la hora de tomar decisiones con respecto a cambios en el sistema de trabajo, y a cómo de aplicables son éstos para los diferentes tipos de actividades.

Palabras Clave: ergonomía, profesionales, métodos observacionales, evaluación del riesgo

3.1.2. Introducción

Los métodos para evaluar la exposición a factores de riesgo para Trastornos Músculo Esqueléticos (TMEs) relativos al trabajo se pueden clasificar de diferentes formas. Por ejemplo, de acuerdo con el grado de exactitud y precisión en la recopilación de datos,

según cómo de invasiva es el método de medición para la labor que realiza el trabajador, según el campo de aplicaciones o el nivel de formación requerido por el profesional para aplicarlos correctamente (Van der Beek and Frings-Dresen, 1998; Wells et al., 1997; Malchaire, 2011; Li and Buckle, 1999). Los métodos instrumentales o de medición directa emplean sensores situados sobre la persona para medir ciertas variables. Estos métodos recogen datos precisos, pero son invasivos, y requieren el empleo de técnicos altamente entrenados y experimentados para asegurar su efectiva aplicación (David, 2005; Trask et al., 2012). Los investigadores prefieren emplear métodos directos, pero son no apropiados para usarse en entornos reales de trabajo (Li and Bucle, 1999)

Los métodos observacionales son métodos basados en la observación directa del trabajador durante la realización de su trabajo. Aunque estos métodos utilizan sistemas de recolección de datos que no son muy precisos y proporcionan resultados bastante generales, tienen la ventaja de ser fáciles de usar, aplicables a un amplio rango de entornos de trabajo, y apropiados para encuestar un gran número de sujetos a un coste relativamente bajo. Además, dado que son relativamente fáciles de usar, requieren un menor nivel de experiencia que otras técnicas, y no requieren procesos de calibración complejos. Por lo tanto, estas técnicas parecen ser las más adecuadas para las necesidades de los profesionales de la seguridad y salud en el trabajo, que tienen a su disposición tiempo y recursos limitados y necesitan una base para establecer las prioridades de intervención (Li and Buckle, 1999).

Sin embargo, aunque el empleo de métodos observacionales es más simple que el de otro tipo de técnicas, los profesionales se enfrentan a varios problemas al aplicarlos en entornos reales de trabajo. Los profesionales deben ser capaces de seleccionar, aplicar y justificar el uso de uno o más métodos de evaluación del riesgo. Estudios de investigación previos han abordado la utilidad y clasificación de los métodos observacionales en función de criterios como la necesidad de instrumental adecuado, el nivel de formación requerido o el factor de riesgo evaluado (Takala et al., 2010; David, 2005; Li and Buckle, 1999; OHSCO, 2008; Malchaire, 2011) y con este propósito, han analizado las características técnicas de cada método. Los resultados de estos estudios pueden servir de guía para la selección del método más adecuados a cada caso, pero no se establece una correlación entre dicha clasificación y el grado en que los métodos son realmente empleados y cómo son percibidos por los profesionales. Algunos trabajos de investigación previos han abordado el problema de determinar qué técnicas de medición observacional se usan en la práctica mediante la realización de encuestas a ergónomos profesionales certificados (Dempsey, McGorry, and Maynard, 2005), o a miembros del Comité de Seguridad y Salud (Pascual and Naqvi, 2008). De acuerdo con Dempsey, McGorry, y Maynard (2005), los ergónomos

encuestados respondieron que usaban un método determinado porque lo encontraron el más apropiado para la tarea evaluada (Dempsey et al., 2005). Sin embargo, esta respuesta plantea la siguiente pregunta: ¿por qué es considerado un método más apropiado que otro para su aplicación en la práctica? Pascual y Naqvi (2008) clasificaron varias herramientas de análisis ergonómico según su facilidad de uso. Aunque estos dos trabajos ofrecen información muy útil, conocer los motivos por los que los profesionales perciben las técnicas observacionales como más o menos útiles puede resultar de gran ayuda en el desarrollo de nuevos métodos de evaluación, que sean aplicables y dirigidos a su uso en el entorno real.

El objetivo fundamental del presente estudio fue determinar qué factores influyen y en qué medida en la utilidad percibida por los profesionales de las técnicas observacionales y hasta qué punto estos factores influyen en su percepción. El trabajo se enfocó en factores de riesgo físicos y métodos observacionales de evaluación relacionados. Existe un rango amplio de factores que potencialmente contribuyen a TMEs y su evaluación requiere un rango de métodos igualmente amplio; por ellos es muy difícil incluirlos todos en un estudio sencillo. Con este propósito, se identificaron los problemas más comunes a los que se enfrentan los profesionales al utilizar estas técnicas, y también, para cada método, hasta qué nivel fueron percibidos estos problemas. Posteriormente, fueron correlacionados los problemas percibidos en cada técnica observacional con la utilidad global que los profesionales perciben en cada método. Para alcanzar el objetivo principal, primero fue necesario alcanzar un objetivo secundario: conocer el perfil demográfico y formativo de los profesionales (quienes no están necesariamente certificados) que hacen uso de los métodos observacionales de evaluación ergonómica, qué técnicas emplean y con qué frecuencia.

3.1.3. Método

En la primera etapa del estudio, los autores y un grupo de ergónomos profesionales certificados realizaron una revisión de los problemas más comunes que los profesionales encontraban en la aplicación práctica de las técnicas observacionales en entornos reales. Algunos estudios previos, así como talleres y entrevistas con profesionales sirvieron para establecer cinco grupos de problemas. Posteriormente, se desarrolló un borrador de encuesta para recoger la opinión de 244 profesionales de 20 países con respecto a 11 técnicas observacionales de uso habitual. Además de información demográfica básica, se les solicitó que indicaran en qué medida detectaban cada tipo de problema en cada método, y la utilidad global percibida de cada técnica.

3.1.3.1. Clasificación de los problemas más comunes

Trabajos previos, talleres y discusiones con profesionales (University of Surrey 2003; Buckle and Li 1996; Li and Buckle 1999; David et al. 2008; David 2005) permitieron identificar varios problemas que necesitan ser solucionados. Los resultados de estos trabajos fueron analizados por los autores y nueve profesionales en ergonomía. Todos ellos tenían una gran experiencia en la prevención de los TMEs y con los métodos observacionales evaluados. Se llevaron a cabo varios talleres de los cuales se obtuvo una lista de los problemas comúnmente encontrados por los profesionales. Tras obtener la lista el equipo de trabajo se centró en agrupar los problemas detectados en función de las características generales de los métodos observacionales con que estaban relacionados. Inicialmente se obtuvo una lista de ocho grupos de problemas fundamentales (grupos de problemas): Información, Formación, Instrumentación, Coste, Complejidad, Tiempo, Adaptabilidad y Validez. Posteriormente, el grupo de expertos decidió disminuir a cinco el número de grupos al encontrar que varios de ellos estaban muy relacionados con la intención de simplificar el desarrollo de la encuesta posterior. Finalmente, fueron denominados los grupos de problemas de la siguiente forma: Información/Formación, Coste/Instrumentación, Complejidad/Tiempo, Adaptabilidad y Significancia.

El grupo Información/Formación contenía problemas relativos a la percepción, habilidades y educación de los profesionales que aplicaban cada método y con la dificultad para localizar información al respecto. Los responsables de llevar a cabo la evaluación de riesgos deben poseer cierto nivel de experiencia y conocimientos para aplicar los métodos correctamente (OHSCO 2008). El nivel de conocimientos necesarios varía según los métodos (Takala et al., 2010). El marco legislativo actual en varios países no garantiza que dicha condición se cumpla. Por ejemplo, la legislación de varios países europeos y americanos no exige a las empresas, que los encargados de llevar a cabo este tipo de evaluaciones posean una formación o cualificación específica, o en caso de exigirla, se limita a una formación muy básica. Por ejemplo, la legislación española indica que las empresas deben contar con representantes de seguridad y salud o comités conjuntos de seguridad y salud formados por trabajadores o gestores de la empresa. En cuanto a sus características, se limita a indicar de forma genérica que deberán tener la suficiente capacidad, disponer de los medios necesarios y ser suficientes en número (Gobierno de España, BOE-A-2003-22861). La formación exigida para que un trabajador de una empresa pueda ser un miembro del comité de seguridad y salud puede limitarse a 30 horas lectivas presenciales, no necesariamente relativos a la ergonomía. Una situación similar se recoge, por ejemplo, en la Ley de Salud y Seguridad Ocupacional (Government of Ontario (Canada), 2011), o menos restrictiva en algunas legislaciones de países latinoamericanos. Así pues, en

varios casos los profesionales no disponen de la formación recomendable para la aplicación de las herramientas de análisis ergonómico o para llevar a cabo una correcta interpretación de los resultados obtenidos de su aplicación. Este problema, es afrontado en ocasiones mediante la autoformación y la búsqueda de información por parte de los profesionales. Sin embargo, la información original sobre un método en particular puede ser de difícil acceso. Los profesionales pueden carecer de los medios para acceder a esta información, obteniéndola de fuentes alternativas que, en varios casos, ofrecen datos incompletos o equivocados tras múltiples interpretaciones. Estas dificultades son mayores para los evaluadores de habla no inglesa, dado que las fuentes de información originales suelen generalmente estar en dicha lengua. Por lo tanto, el nivel de formación y la facilidad para acceder a la información respecto a un método determinado puede influir en el grado de aplicabilidad y utilidad percibida por los profesionales sobre dicho método.

El grupo Coste/Instrumentación reunió los problemas indicados por los profesionales relativos a los requerimientos técnicos de las técnicas observacionales y con el coste de su aplicación. La aplicación de las técnicas debe ser efectiva a nivel de coste para la organización (David, 2005). En ese sentido, el coste para realizar las evaluaciones y analizar los datos varía según los diferentes métodos. Debe disponerse de equipos e instrumentos apropiados para recopilar los datos y la información necesarios para el método de evaluación del riesgo seleccionado (Takala et al., 2010). Los profesionales indicaron que en ocasiones no disponían del adecuado equipamiento para la aplicación de métodos determinados, ni tampoco del entrenamiento necesario para emplear dichos instrumentos. Aunque no es el único factor influyente, la cantidad y complejidad del equipamiento necesario están relacionadas en gran medida con los costes de aplicación de las técnicas, tanto por el coste del equipamiento en sí como por el tiempo requerido para su uso.

El grupo Complejidad/Tiempo agrupa los problemas relativos a la Complejidad de aplicación de los métodos y el Tiempo requerido para llevarlo a cabo. Malchaire (2011), clasifica los métodos observacionales según este criterio. Una queja general entre los profesionales es que los métodos pueden requerir mucho tiempo y ser laboriosos (University of Surrey, 2003; Buckle and Li, 1996). Por ejemplo: “demasiados trámites administrativos”, “los formularios podrían ser muy difíciles de contestar”, “es difícil obtener los datos solicitados por el método”, “se emplea mucho tiempo en recoger la información o rellenar cuestionarios”. Los profesionales de seguridad y salud en el trabajo disponen de un tiempo limitado para llevar a cabo la evaluación, por lo tanto, necesitan técnicas para evaluar la exposición que sean fáciles y rápidas de usar. La complejidad del método y el tiempo consumido en su aplicación puede ser un factor relevante en la utilidad del mismo percibida por el profesional.

El análisis de los problemas detectados comprobó la necesidad de técnicas que sean suficientemente flexibles para ser aplicadas a un grupo de puestos de trabajo y que sean completas y fiables para varios factores de riesgo. En el grupo de problemas de Adaptabilidad quedaron englobados problemas tales como “los métodos no siempre encajan en una situación práctica”. El rango de factores considerados por diferentes métodos varía ampliamente, y varios de ellos evalúan los riesgos en determinadas partes del cuerpo y en condiciones concretas (Li and Buckle, 1999; David, 2005; OHSCO, 2008). Las condiciones que debe cumplir la tarea para poder aplicar un método determinado especifican en qué medida ésta puede adaptarse a las situaciones particulares de cada puesto. El requerimiento para que una técnica de evaluación fuera suficientemente flexible para aplicarse a diferentes puestos de trabajo fue uno de los varios factores clave identificados por los profesionales (David, 2005).

Los profesionales se enfrentan al reto de evitar o reducir el número de TME en el puesto de trabajo y necesitan una base para establecer las prioridades de intervención. Los métodos observacionales fueron desarrollados en su mayor parte para establecer relaciones generales entre los estresores laborales y la prevalencia de TME, mas que para solventar un problema en un puesto de trabajo específico (Malchaire, 2011). El grupo Significancia recoge los problemas que los profesionales encuentran para interpretar o aprovechar de forma práctica los resultados obtenidos de los métodos observacionales. Algunas demandas clave son, por ejemplo, que los resultados deben ser fácilmente interpretables, que deben ser útiles para detectar problemas, y deben servir como guía para conocer las causas y posibles soluciones de cara a demostrarle la necesidad de mejorar el lugar de trabajo a los gerentes y estimular los cambios en el sistema de trabajo dentro de la organización.

3.1.3.2. Encuesta

Establecidos los grupos de problemas, se procedió al desarrollo de una encuesta para recoger la opinión de los profesionales respecto a en qué medida estos problemas estaban presentes en métodos observacionales concretos. Para el desarrollo de la encuesta se dispuso de información procedente de [ergonautas.com](http://www.ergonautas.com). Ergonautas es una plataforma online (<http://www.ergonautas.upv.es>) dirigida por el equipo que desarrolló el presente trabajo, centrada en ofrecer información y software online para la aplicación de múltiples herramientas para la evaluación ergonómica de puestos de trabajo en lengua española. En la actualidad cuenta con más de 90.000 usuarios registrados procedentes de 60 países. Están registrados online cerca de 5.000 de estos usuarios como profesionales. La diferencia entre un usuario registrado como profesional y un usuario estándar es que los primeros deben pagar por el uso del software online disponiendo de usabilidades avanzadas,

mientras que para los segundos el uso es gratuito y con menos usabilidades. Al registrarse, los usuarios profesionales completan un formulario sobre su perfil personal.

3.1.3.2.1. Selección de los encuestados

Se empleó la base de datos de la plataforma online para analizar los perfiles de 4.824 profesionales registrados. Se eliminaron los profesionales que no habían iniciado sesión en la plataforma online en los 6 últimos meses. Finalmente, se obtuvo una lista 1.500 usuarios registrados como profesionales que habían realizado evaluaciones ergonómicas empleando el software de la plataforma, pertenecientes a empresas de más 10 trabajadores.

Se envió un correo electrónico a los 1.500 profesionales seleccionados con información sobre el estudio e instrucciones sobre cómo participar en el mismo. Se les solicitó que comprobaran, y si era necesario, actualizaran los datos sobre ellos, su situación laboral, y su actividad relativa al empleo de técnicas de medición observacional para actividades relativas a su empresa en la base de datos de la plataforma. Los usuarios en el estudio fueron recompensados con una renovación gratuita de su registro en la plataforma web. Se recibió respuesta de 954 usuarios y, tras la revisión de los datos actualizados, se excluyó a 167 debido a cambios en su situación laboral o su perfil. Finalmente se obtuvo una lista de 787 profesionales.

3.1.3.2.2. Desarrollo de la encuesta

La encuesta fue desarrollada por el mismo grupo de trabajo que participó en la etapa anterior del estudio y constó de dos partes (Ver Apéndice A). En la primera parte de la encuesta se recogió información demográfica (edad y sexo) e información respecto al tiempo de experiencia del encuestado en la evaluación de riesgos ergonómicos. Se preguntó si el encuestado poseía una titulación o certificación que le habilitara de forma oficial para desarrollar las tareas que lleva a cabo en su empresa en el área de ergonomía y la prevención de riesgos laborales. La redacción de esta pregunta fue profundamente revisada para evitar confusiones puesto que las leyes y normativas de cada estado difieren en cuanto a la titulación o certificación exigida. Por último, se solicitó a los encuestados que indicaran si, en su opinión, habían recibido la formación suficiente sobre evaluación de riesgos ergonómicos como para realizar su tarea de forma adecuada.

En esta primera parte se pidió a los encuestados que indicaran, de una lista de métodos observacionales, cuáles empleaban y, en caso de no emplearlas, por qué no. Para la selección de las técnicas a incluir en la encuesta se empleó el registro de accesos de Ergonautas. La plataforma ofrece más de 20 aplicaciones online de varios métodos observacionales de evaluación. Cada vez que un usuario completa una evaluación

ergonómica con un software determinado es actualizado el registro de accesos, pudiendo conocerse cuántas veces es empleada cada herramienta y por qué usuarios. Se analizó el registro de accesos del año 2011 contabilizando cuántas veces fue empleada cada herramienta por usuarios profesionales. La intención inicial del equipo que seleccionó los métodos a incluir en la encuesta fue limitar el número a 10 para evitar que el tiempo para completarla fuera excesivamente largo y provocara aburrimiento en los encuestados. Sin embargo, el análisis de las estadísticas de uso de las herramientas online mostró que 11 eran significativamente más usadas que el resto, por lo que se decidió ampliar el número de métodos a 11: la Ecuación para el Levantamiento Manual de Carga del Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) (Waters et al., 1993), Tablas de Snook y Ciriello (Snook and Ciriello, 1991), Guía para el Levantamiento de Carga del INSHT (GINSHT) (INSHT, 1998); Valoración Rápida del Cuerpo Completo (REBA) (Hignett and McAtamney, 2000), Valoración Rápida de los Miembros Superiores (RULA) (McAtamney and Corlett, 1993), Sistema de Evaluación de Postura Laboral de Owako (OWAS) (Karhu et al., 1977), Evaluación de la Repetitividad de Movimientos (JSI) (Moore and Garg, 1995); Evaluación del Riesgo Asociado al Trabajo Repetitivo (OCRA) (Occhipinti, 1998), y OCRA Checklist (Colombini et al., 2000) para la Evaluación de la Repetitividad de Movimientos; método del Laboratorio de Economía y Sociología del Trabajo (LEST) (Guelaud et al., 1977); y por último el Modelo Biomecánico de Chaffin (BiomechEEC) (Chaffin, 1969).

Así pues, los encuestados rellenaron una sección preliminar indicando qué métodos observacionales usaban. Para cada uno, se les pidió completar un formulario con siete preguntas acerca de la usabilidad y utilidad del método. Una pregunta correspondió a la frecuencia con que ellos utilizaban este método. Otras cinco correspondieron a cada uno de los grupos de problemas (ver sección 3.1.3.1.), con el objetivo de asegurar que estas preguntas fueran claras para los profesionales. A los encuestados se les preguntó si ellos realmente percibían cada clase de problema, y en qué medida. La última pregunta le solicitó a los encuestados hacer una valoración general en cuanto a las características de los métodos, la forma en que fueron empleados éstos y los beneficios que se obtuvo al usarlos.

3.1.3.2.3. Método de Encuesta

La encuesta fue realizada mediante formularios en línea en la plataforma Ergonautas. En la primera página de la encuesta se ofreció información sobre la forma de completarla. Tras esta primera página se mostró una segunda con la primera parte de la encuesta. Después de completarla se mostraron al encuestado los formularios sobre cada método (aquellos que habían seleccionado en la primera parte de la encuesta). En noviembre de 2012 fue recibida la primera encuesta y el plazo para completarla finalizó en abril de 2013.

3.1.3.2.4. Análisis de los datos

Se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo de las respuestas recibidas y se realizó una Prueba de Spearman, empleando para ello los 955 formularios de métodos de evaluación. El objetivo de la Prueba de Correlación de Spearman fue determinar la existencia de correlaciones entre las valoraciones de los métodos en cada grupo de problemas, y la utilidad global de dichos métodos percibida por los profesionales.

3.1.4. Resultados

Se recibió respuesta de 267 profesionales. Dado que el número de los profesionales a los que se les invitó a participar fue 787, la tasa de respuesta fue aproximadamente un 34%. 23 respuestas del total de las encuestas recibidas fueron eliminadas del estudio porque el tiempo empleado por los encuestados para completarla fue excesivamente corto. Como criterio se estableció que debía haberse empleado al menos un minuto y medio en responder la primera parte de la encuesta, y un minuto por cada formulario correspondiente a cada método valorado. Así pues, finalmente se analizaron los datos recibidos de 244 profesionales. La segunda parte de cada encuesta comprendió un formulario para cada método empleado por el encuestado. En total se analizaron 955 formularios. El tiempo medio empleado para responder las encuestas fue de 12 minutos y 14 segundos, contados desde la presentación de la encuesta hasta la recepción de los datos. El país de origen de los encuestados se distribuyó de la siguiente forma: España (21,31%), Chile (11,07%), Colombia (10,25%), México (9,84%), Venezuela (8,61%), Argentina (8,61%), Perú (6,56%), Estados Unidos (4,92%), Ecuador (4,51%), Guatemala (3,28%), Costa Rica (2,05%) y otros países (8,61%). Se distribuyó la edad de los encuestados de la siguiente forma: menos de 25 años (29,10%), entre 26 y 35 años (39,75%), entre 36 y 45 años (23,36%) y más de 45 años (7,79%). El 62,30% eran hombres y el 37,70% mujeres.

El 18,85% de los encuestados poseía experiencia en el ámbito de la evaluación de riesgos ergonómicos menor de 3 años, 28,69% entre 3 y 6 años, 39,34% entre 6 y 9 años, 13,11% entre 9 y 12 años y 5,74% más de 12 años de experiencia. 199 encuestados (81,56%) declararon tener una titulación o certificación que le habilitaba de forma oficial para desarrollar las tareas que lleva a cabo en su empresa en el área de ergonomía y prevención de riesgos laborales, mientras que 45 (18,44%) respondieron no tenerla. Respecto a si consideraban que habían recibido la formación suficiente sobre evaluación de riesgos ergonómicos como para realizar su tarea de forma adecuada, 146 (59,84%) respondieron "sí", y 98 (40,16%) consideraron no poseer la formación suficiente.

El número de diferentes métodos de evaluación empleado por cada profesional varió entre uno y ocho, siendo el valor más frecuente cuatro y la media 3,91. La Tabla 2 muestra los

resultados respecto al uso de los métodos de evaluación. Los métodos más empleados fueron RULA, la ecuación para el Levantamiento Manual de Carga de NIOSH, REBA y OWAS, mientras que las Tablas de Snook y Ciriello y el Modelo Biomecánico de Chaffin fueron los métodos menos empleados de los incluidos en el estudio. Cuando los encuestados respondieron que no usaban un método se les preguntó acerca de la razón. Las razones principales fueron: “no conozco este método” o “no tengo el conocimiento suficiente para usarlo”.

Método Observacional	¿Ha usado este método?		¿Con qué frecuencia usa el método?				
	Si	No	Una vez al año o menos	6 Cada meses	3 Cada meses	Una vez al mes	Más de una vez al mes
RULA	194 79,51%	50 20,49%	26 13,40%	65 33,51%	72 37,11%	22 11,34%	9 4,64%
REBA	138 56,56%	106 43,44%	13 9,42%	58 42,03%	46 33,33%	15 10,87%	6 4,35%
OWAS	139 56,97%	106 43,03%	32 23,02%	63 45,32%	30 21,58%	10 7,19%	4 2,88%
LEST	44 18,03%	200 81,97%	26 59,09%	12 27,27%	3 6,82%	3 6,82%	0 0%
NIOSH Lifting Ecuación	144 59,02%	100 40,98%	26 18,06%	60 41,67%	41 28,47%	10 6,94%	7 4,86%
JSI	49 20,08%	195 79,92%	13 26,63%	31 63,27%	3 6,25%	1 2,04%	1 2,04%
G-INSHT	60 24,59%	184 75,41%	16 26,67%	22 36,67%	19 31,67%	3 5%	0 0%
Snook and Ciriello Tablas	29 11,89%	215 88,11%	4 13,79%	7 24,14%	12 41,38%	5 17,24%	1 3,45%
OCRA	49 20,08%	195 79,92%	20 40,82%	17 34,69%	9 18,37%	3 6,12%	0 0%
OCRA Checklist	76 31,15%	168 68,85%	12 15,79%	20 26,32%	27 35,53%	8 10,53%	9 11,84%
Modelo Biomecánico Chaffin	33 13,52%	211 86,48%	7 21,21%	23 69,70%	1 3,03%	2 6,06%	0 0%

Tabla 2. Profesionales que usaban cada método y frecuencia de uso (porcentajes y frecuencias)

En la Tabla 3 se muestran las respuestas respecto a los métodos observacionales. Todos los métodos obtuvieron buenas valoraciones en utilidad general. Únicamente JSI, G-INSHT, el Modelo Biomecánico de Chaffin y la Ecuación de Levantamiento Manual de Cargas de NIOSH fueron valorados por más de un 10% de los encuestados como “poco útil” o “inútil”. Los métodos OWAS, LEST, REBA y RULA fueron considerados como “útiles” o “muy útiles” por más del 95% de los encuestados. En cuanto al grupo de problemas de Información/Formación, más del 50% de los encuestados encontraron algún tipo de carencia en OCRA (59,18%), OCRA Checklist (57,90%), LEST (54,55%) y Tablas de Snook y Ciriello (51,73%). Los métodos mejor valorados en el grupo de problemas Coste/Instrumentos fueron G-INSHT y las Tablas de Snook y Ciriello, siendo mayor del 60% el porcentaje de encuestados que consideraban que su aplicación conlleva costes humanos y materiales bajos respecto a otros métodos. OCRA, OCRA Checklist, y el Modelo Biomecánico de Chaffin fueron los métodos en los que se percibió mayor cantidad de problemas del grupo de problemas Complejidad/Tiempo. Más del 30% de encuestados consideró estos métodos más complejos y pérdida de tiempo que en el resto de técnicas. OWAS y LEST fueron los métodos más versátiles (adaptabilidad en el grupo de problemas). Más del 87% de los encuestados indicaron que podían ser aplicados a bastantes o varios tipos de puestos de trabajo, y que se adaptaban bien o muy bien, a situaciones particulares. Finalmente, las técnicas mejor valoradas en cuanto a la significancia de grupos problema fueron OCRA, RULA, OWAS, REBA y LEST. Más del 90% de los encuestados opinaron que los resultados de estos métodos reflejan adecuadamente el riesgo presente y servían de apoyo para determinar la necesidad de intervenir en el puesto.

Se trató de encontrar correlaciones entre las respuestas a las preguntas de los cinco grupos de problemas y la utilidad general percibida por los usuarios. Se consideraron los datos como una variable cualitativa ordinal, por lo que se seleccionó una prueba no paramétrica (Siegel and Castellan, 1988). Aunque es posible convertir las escalas ordinales en sus equivalentes numéricos para analizar los datos con pruebas paramétricas, y en ocasiones esto puede resultar razonable, este enfoque puede suponer una interpretación errada de los resultados, por ejemplo, cuando las respuestas no se ajustan a una distribución normal (Kitchenham and Pfleeger, 2003). Por ello, se corrió una prueba de correlación de Spearman's orden-rango empleando los 955 casos disponibles. Se encontraron correlaciones positivas entre las cinco variables independientes (las valoraciones de los métodos realizadas por los profesionales en aspectos referentes a los cinco grupos problema) y la variable dependiente (la utilidad total de los métodos percibida por los profesionales). En todos los casos fueron significativas ($p < 0,05$) las correlaciones con un nivel de confianza del 95%. En la Tabla 4 se muestran los resultados.

Método Observacional	(B)[1] Información/Formación			(C) Costo/Instrumentación			(D) Complejidad/Tiempo					(E) Adaptabilidad			(F) Significancia				(G) Utilidad General				
	Si conozco suficientemente el método o dispongo de toda la información necesaria y ésta es fácilmente accesible.	Sería necesario tener algo más de formación o que la información necesaria fuera más accesible	No, necesitaría mucha más formación e información	Si la aplicación de este método conlleva costes humanos y materiales muy bajos respecto a otros métodos	Considero que los costes derivados de aplicar este método están aproximadamente en la media de los costes de aplicar [...]	No, la aplicación de este método supone elevados costes humanos y/o materiales con respecto a otros métodos	Es especialmente simple y necesita mucho menos tiempo que otros métodos	Es algo más simple y necesita algo menos de tiempo que otros métodos	La complejidad y el tiempo requerido está más o menos en la media de este tipo de métodos	Es algo más complejo y necesita algo más de tiempo que otros métodos	Es especialmente complejo y necesita mucho más tiempo que otros métodos	Si, el método es aplicable a muchos tipos puestos de trabajo y se adapta bien a casi todas las situaciones particulares	Puede aplicarse a bastantes tipos de puestos de trabajo y se adapta bien a algunas situaciones particulares	En muchos casos el método no es aplicable a situaciones muy habituales	No, el método es muy rígido. Muy pocos puestos reúnen las condiciones para ser evaluados con él y no contempla [...]	Si, los resultados siempre reflejan claramente el riesgo presente en puesto y la necesidad de adoptar medidas	En general los resultados reflejan el riesgo presente en puesto y la necesidad de adoptar medidas	En ocasiones los resultados no reflejan el riesgo presente en el puesto o no sirven para determinar si es necesario intervenir	No, los resultados casi nunca reflejan el riesgo presente en el puesto y no sirven para determinar si es necesario intervenir.	Muy útil	Bastante útil	Poco útil	Inútil
RULA	98	91	5	103	84	7	20	45	99	29	1	67	94	31	2	78	104	12	0	96	90	8	0
	50,52%	46,91%	2,58%	53,09%	43,3%	3,61%	10,31%	23,2%	51,03%	14,95%	0,52%	34,54%	48,45%	15,98%	1,03%	40,21%	53,61%	6,19%	0,00%	49,48%	46,39%	4,12%	0,00%
REBA	73	62	3	77	55	6	15	24	79	19	1	45	72	20	1	47	78	11	2	72	61	5	0
	52,9%	44,93%	2,17%	55,8%	39,86%	4,35%	10,87%	17,39%	57,25%	13,77%	0,72%	32,61%	52,17%	14,49%	0,72%	34,06%	56,52%	7,97%	1,45%	52,17%	44,2%	3,62%	0,00%
OWAS	75	60	4	72	59	8	15	24	83	15	2	36	86	16	1	46	84	8	1	62	76	1	0
	53,96%	43,17%	2,88%	51,8%	42,45%	5,76%	10,79%	17,27%	59,71%	10,79%	1,44%	25,9%	61,87%	11,51%	0,72%	33,09%	60,43%	5,76%	0,72%	44,6%	54,68%	0,72%	0,00%
LEST	20	24	0	19	23	2	3	6	28	5	2	12	27	5	0	11	30	3	0	18	25	1	0
	45,45%	54,55%	0,00%	43,18%	52,27%	4,55%	6,82%	13,64%	63,64%	11,36%	4,55%	27,27%	61,36%	11,36%	0,00%	25,00%	68,18%	6,82%	0,00%	40,91%	56,82%	2,27%	0,00%
Ecuación NIOSH	75	63	6	71	62	11	14	35	70	23	2	28	79	33	4	47	82	14	1	57	71	13	3
	52,08%	43,75%	4,17%	49,31%	43,06%	7,64%	9,72%	24,31%	48,61%	15,97%	1,39%	19,44%	54,86%	22,92%	2,78%	32,64%	56,94%	9,72%	0,69%	39,58%	49,31%	9,03%	2,08%
JSI	28	18	3	23	21	5	7	8	27	7	0	19	15	15	0	19	23	6	1	22	20	6	1
	57,14%	36,73%	6,12%	46,94%	42,86%	10,2%	14,29%	16,33%	55,1%	14,29%	0,00%	38,78%	30,61%	30,61%	0,00%	38,78%	46,94%	12,24%	2,04%	44,9%	40,82%	12,24%	2,04%
GINSHT	37	23	0	36	22	2	4	11	40	3	2	12	37	8	3	11	39	8	2	26	26	6	2
	61,67%	38,33%	0,00%	60,00%	36,67%	3,33%	6,67%	18,33%	66,67%	5,00%	3,33%	20,00%	61,67%	13,33%	5,00%	18,33%	65,00%	13,33%	3,33%	43,33%	43,33%	10,00%	3,33%
Tablas Snook	14	13	2	19	9	1	4	8	14	3	0	13	11	4	1	11	15	3	0	13	14	2	0
	48,28%	44,83%	6,9%	65,52%	31,03%	3,45%	13,79%	27,59%	48,28%	10,34%	0,00%	44,83%	37,93%	13,79%	3,45%	37,93%	51,72%	10,34%	0,00%	44,83%	48,28%	6,9%	0,00%
OCRA	20	29	0	21	26	2	0	4	28	17	0	13	26	9	1	15	31	1	2	15	31	3	0
	40,82%	59,18%	0,00%	42,86%	53,06%	4,08%	0,00%	8,16%	57,14%	34,69%	0,00%	26,53%	53,06%	18,37%	2,04%	30,61%	63,27%	2,04%	4,08%	30,61%	63,27%	6,12%	0,00%
OCRA Checklist	32	43	1	34	36	6	1	9	42	23	1	19	36	18	3	15	50	11	0	22	48	6	0
	42,11%	56,58%	1,32%	44,74%	47,37%	7,89%	1,32%	11,84%	55,26%	30,26%	1,32%	25,00%	47,37%	23,68%	3,95%	19,74%	65,79%	14,47%	0,00%	28,95%	63,16%	7,89%	0,00%
Modelo Biom. Chaffin	18	11	4	13	17	3	1	2	17	13	0	10	16	6	1	10	18	5	0	12	17	4	0
	54,55%	33,33%	12,12%	39,39%	51,52%	9,09%	3,03%	6,06%	51,52%	39,39%	0,00%	30,3%	48,48%	18,18%	3,03%	30,3%	54,55%	15,15%	0,00%	36,36%	51,52%	12,12%	0,00%

Tabla 3. Resultados a las preguntas sobre los métodos observacionales (porcentajes y frecuencias).

		Información/ Formación	Coste/ Instrumentación	Complejidad/ Tiempo	Adaptabilidad	Significancia
Utilidad General	Correlación	0,3331	0,3604	0,2314	0,5067	0,6102
	Valor P	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla 4. Resultados de la Prueba de Correlación de Spearman's (r_s y p)

3.1.5. Discusión

Los resultados obtenidos muestran correlaciones positivas significativas entre las variables Información/Formación, Coste/Instrumentación, Complejidad/Tiempo, Adaptabilidad y Significancia (tal como han sido definidas en la sección 3.1.3.1), y la utilidad total percibida de las técnicas observacionales de evaluación ergonómica. Dada la formulación de la encuesta de la que se han obtenido los datos, esto significaría que cuantos menos problemas de cada uno de los grupos de problemas perciben los profesionales en un método de evaluación, más útil perciben dicho método. El análisis de los factores de correlación muestra que unas variables influyen en mayor medida que otras en la utilidad percibida. La correlación fue fuerte para la variable significancia (0,6102), moderada para adaptabilidad (0,5067), y puede considerarse débil para Coste/Instrumentación (0,3604), Información/ Formación (0,3331) y Complejidad/Tiempo (0,2314).

La fuerte correlación de la variable Significancia con la utilidad percibida de los métodos indica la gran importancia que los profesionales otorgan a que las técnicas observacionales ofrezcan resultados fácilmente interpretables que reflejen el nivel de riesgo real. En este grupo se consideró también que los resultados de los métodos sirvan como guía para conocer las causas y para demostrar la necesidad de mejoras en el lugar de trabajo de los directivos y fomentar cambios en el sistema de trabajo dentro de la organización. A la vista de este resultado parece necesario un esfuerzo significativo en el desarrollo de técnicas que no se limiten a establecer relaciones generales entre los estresores laborales y la prevalencia de TME. Para suponer una mejora efectiva de las condiciones de los puestos, las herramientas deben servir también de apoyo en el proceso de toma de decisiones respecto al rediseño o re-ingeniería que lógicamente se sigue cuando se identifica el riesgo. Parece lógico pensar que el desarrollo de técnicas con estas características facilitará a los profesionales el involucrar a los gerentes en el cambio de los sistemas de trabajo actuales.

La moderada correlación entre la variable Adaptabilidad y la utilidad percibida (0,5067), indica que los profesionales consideran importante que los métodos observacionales puedan ser aplicados a diferentes puestos de trabajo, que sean integrales y fiables para una serie de factores de riesgo y que permitan considerar aspectos específicos de los puestos analizados. Desarrollar técnicas con estas características puede resultar un reto para los investigadores. Alcanzar un grado elevado de generalización y al mismo tiempo contemplar

situaciones particulares puede llevar al desarrollo de métodos cuya aplicación sea más compleja y demandante en tiempo. Sin embargo, según los resultados de este estudio los profesionales dan menos importancia a la complejidad de los métodos que a su capacidad de adaptarse a entornos reales al valorar la utilidad de las técnicas.

En definitiva, es necesario prestar atención especial al desarrollo de métodos que sirvan de apoyo en el proceso de toma de decisiones respecto a los cambios en los sistemas de trabajo, aplicables a diferentes tipos de puestos y que permitan contemplar características particulares habitualmente presentes en los puestos. Lograr este objetivo puede significar un aumento de la complejidad de aplicación de estos métodos y de la formación requerida por los profesionales, así como el coste y el tiempo necesario para su empleo. Sin embargo, estos aspectos parecen estar menos correlacionados con la utilidad global de los métodos.

Es necesario también hacer algunas consideraciones sobre la encuesta desarrollada en este estudio. A la hora de definir las preguntas a realizar sobre los métodos se analizaron los problemas más habituales en el uso de los mismos agrupándolos en ocho categorías (grupos de problemas). El número de grupos fue posteriormente disminuido a cinco, después de combinar ciertas categorías inicialmente consideradas. El objetivo fue que el formulario sobre cada método pudiera completarse en el menor tiempo posible. Si el número de preguntas es demasiado grande, o los encuestados toman mucho tiempo en la encuesta, esto puede conducir a fatiga, lo que reduce la fiabilidad de los datos obtenidos (Brace, 2013; Savage and Waldman, 2008). Por el mismo motivo, el número de métodos introducidos en la encuesta fue limitado a 11. Existe una gran cantidad de métodos seleccionados a disposición de los ergónomos y no es posible considerarlas todas en una encuesta. Los métodos fueron seleccionados de forma que fueran representativos de los que los profesionales usan en su trabajo de forma habitual.

Se pidió a los encuestados que completaran un formulario con su opinión sobre los métodos observacionales que empleaban de forma habitual, pero no se les solicitó que opinaran sobre métodos que no empleaban. Haberlo hecho podría haber resultado útil para conocer cuáles eran los motivos por los que no las utilizaban. Sin embargo, el hecho de no utilizar un método determinado no tiene por qué estar correlacionado con la utilidad del mismo. Puede ocurrir que, simplemente, no fue necesario su uso o que el encuestado no lo conocía. Durante el desarrollo de la encuesta se consideró preferible evitar recoger opiniones sobre métodos no empleados para garantizar que las respuestas correspondían a métodos bien conocidos por los encuestados. Los resultados han mostrado que esta decisión fue correcta porque en casi el 64% de los casos la razón para no utilizar un método “no conozco este método” o “no tengo el conocimiento suficiente para utilizarlo”.

Una posible limitación de este trabajo es que, a pesar de que fue respondida la encuesta por 244 profesionales de 20 países diferentes, todos ellos eran hispanohablantes. Se encontró que en la lista de métodos empleados habitualmente aparece la Guía Técnica para la Evaluación de la Levantamiento Manual de Cargas (G-INSHT), desarrollada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo del Ministerio de Empleo y Seguridad Social de España (INSHT, 1998). La guía en la que se describe este método observacional está escrita en español, y los autores no encontraron información sobre ella en inglés. Por ello puede resultar desconocida para los profesionales que desarrollan su labor en países de habla no hispana. Además, los participantes en la encuesta fueron seleccionados de entre los usuarios de software online para la evaluación ergonómica de puestos de trabajo. Por ello, todos los entrevistados emplearon software de apoyo cuando utilizan los métodos observacionales de evaluación. Esto puede influir sobre los resultados obtenidos respecto a la variable Complejidad/Tiempo, dado que el empleo del software facilita tareas de cálculo o búsqueda de datos tabulados. Los resultados de esta variable podrían ser diferentes en caso de que los encuestados hubieran usado los métodos sin apoyo informático.

Por último, se aplicó la encuesta a 244 profesionales de los que se conocía que desarrollaban tareas de evaluación ergonómica de puestos de trabajo en sus empresas. Sin embargo, no se exigió que tuvieran más certificación de sus competencias que la requerida en sus países respectivos para el desempeño de su labor. Esto se hizo así porque, como se ha indicado anteriormente, las legislaciones de cada país difieren en cuanto a la exigencia de titulación, certificación o formación de los ergónomos. Esto conlleva que, en la práctica real, el perfil formativo del usuario de los métodos observacionales sea muy diverso.

3.1.6. Conclusiones

El objetivo principal de este estudio fue determinar en qué medida los requerimientos de los métodos observacionales, tal y como los perciben los profesionales durante su aplicación en la práctica, influyen en el nivel de utilidad global que perciben de los mismos. Los resultados muestran que, al juzgar la utilidad de un método observacional, los profesionales otorgan importancia especial al apoyo que éste da al proceso de toma de decisiones cuando hay cambios en los sistemas de trabajo, a que sea aplicable a diferentes tipos de puestos de trabajo y a si permite o no contemplar características específicas de cada puesto. La complejidad de aplicación, la formación requerida, o el coste y el tiempo necesario para su empleo, parecen ser factores menos influyentes en la utilidad global percibida. Los resultados de este estudio pueden servir como guía a los investigadores en el desarrollo de nuevos métodos de evaluación que resulten más útiles y aplicables en entornos reales de trabajo.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Programa estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los retos de la sociedad del Gobierno de España [bajo la Subvención TIN2013-42504-R].

3.1.7. Referencias

- Brace, I., 2013. Questionnaire design: how to plan, structure, and write survey material for effective market research, 3rd ed. London.
- Buckle, P., Li, G., 1996. User needs in exposure assessment for musculoskeletal risk assessment, in: Proceedings of 1st International Cyberspace Conference on Ergonomics "Cyberg."
- Chaffin, D.B., 1969. A computerized biomechanical model: development of and use in studying gross body actions. *J. Biomech.* 2, 429–441.
- Colombini, D., Occhipinti, E., Cairolì, S., Barracco, A., 2000. Proposal and preliminary validation of a check-list for the assessment of occupational exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Med. Del Lav.* 102, 1–39.
- David, G., Woods, V., Li, G., Buckle, P., 2008. The development of the Quick Exposure Check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Appl. Ergon.* 39, 57–69.
- David, G.C., 2005. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occup. Med. (Lond).* 55, 190–9.
- Dempsey, P.G., McGorry, R.W., Maynard, W.S., 2005. A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists. *Appl. Ergon.* 36, 489–503.
- Genaidy, A.M., Al-Shedi, A.A., Karwowski, W., 1994. Postural stress analysis in industry. *Appl. Ergon.* 25, 77–87.
- Government of Ontario (Canada), 2011. Occupational Health and Safety Act. Retrieved May 21, 2014 from http://www.e-laws.gov.on.ca/html/statutes/english/elaws_statutes_90o01_e.htm.
- Guelaud, F., Beauchesne, M.N., Gautrat, J., Roustang, G., 1977. Pour une analyse des conditions du travail ouvrier dans l'entreprise. Laboratoire d'économie et de sociologie du travail, C.N.R.S., Aix-en-Provence.
- Hignett, S., McAtamney, L., 2000. Rapid entire body assessment (REBA). *Appl. Ergon.* 31, 201–5.
- INSHT, 1998. Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la manipulación manual de cargas. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo de España, Madrid.
- Jefatura del Estado Español, 2003. Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales. *Boletín Of. del Estado* 298, 44408–

44415.

- Karhu, O., Kansi, P., Kourinka, I., 1977. Correcting working postures in industry: a practical method for analysis. *Appl. Ergon.* 8, 199–201.
- Kitchenham, B., Pfleeger, S.L., 2003. Principles of survey research part 6. *ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes* 28, 24.
- Li, G., Buckle, P., 1999. Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. *Ergonomics* 42, 674–695.
- Malchaire, J., 2011. A classification of methods for assessing and / or preventing the risks of musculoskeletal disorders. European Trade Union Institute.
- McAtamney, L., Corlett, E.N., 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Appl. Ergon.* 24, 91–9.
- Occhipinti, E., 1998. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41, 1290–1311.
- OHSCO, 2008. Musculoskeletal disorders prevention series. Part 3C: MSD prevention toolbox - More on in-depth risk assessment methods [WWW Document]. *Occup. Heal. Saf. Counc. Ontario*. URL http://www.iwh.on.ca/system/files/documents/msd_prevention_toolbox_3c_2007.pdf (accessed 5.25.14).
- Pascual, S.A., Naqvi, S., 2008. An investigation of ergonomics analysis tools used in industry in the identification of work-related musculoskeletal disorders. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 14, 237–45.
- Savage, S.J., Waldman, D.M., 2008. Learning and fatigue during choice experiments: a comparison of online and mail survey modes. *J. Appl. Econ.* 23, 351–371.
- Siegel, S., Castellan, N.J., 1988. *Nonparametric statistics for the behavioral sciences* (2nd ed.), *Nonparametric statistics for the behavioral sciences* (2nd ed.).
- Snook, S.H., Ciriello, V.M., 1991. The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. *Ergonomics*. 34, 1197–1213.
- Steven, J., Garg, A., 1995. The strain index: a proposed method to analyze jobs or risk for distal upper extremity disorders. *American industrial hygiene association journal*. 56, 453–458.

- Takala, E.-P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G.-Å., Mathiassen, S.E., Neumann, W.P., Sjøgaard, G., Veiersted, K.B., Westgaard, R.H., Winkel, J., 2010. Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scand. J. Work. Environ. Health* 36, 3–24.
- Trask, C., Mathiassen, S., 2012. Data collection costs in industrial environments for three occupational posture exposure assessment methods. *BMC Med. Res. Methodol.* 12, 89.
- University of Surrey, 2003. Assessing musculoskeletal disorders at work: which tools to use when? [WWW Document]. Guildford. URL http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/1999/crr99251.pdf (accessed 6.6.14).
- Van der Beek, A.J., Frings-Dresen, M.H., 1998. Assessment of mechanical exposure in ergonomic epidemiology. *Occupational environmental medicine.* 55, 291–299.
- Waters, T.R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L.J., 1993. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics.* 36, 749–776.
- Wells, R., Norman, R., Neumann, P., Andrews, D., 1997. Assessment of physical work load in epidemiologic studies: common measurement metrics for exposure assessment. *Ergonomics.* 37, 979–88.

CAPÍTULO IV. - ARTICULO II

4.1. Uso de sensores RGB-D y algoritmos genéticos para la optimización de diseños en puestos de trabajo.

Se presenta a continuación el segundo artículo que forma parte del compendio de artículos de esta TD, junto con la referencia completa adaptada al formato de la tesis. El artículo fue publicado en la revista *Applied Ergonomics*, volumen 65, páginas 530-540, el 19 de enero 2017. En el año de la publicación, la revista estaba clasificada dentro del primer cuartil de su categoría, con un factor de impacto de 0.875.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.01.012>

4.1.1. Resumen

Los sensores RGB-D pueden recopilar datos posturales de una forma automatizada. Sin embargo, las aplicaciones de estos dispositivos en entornos reales de trabajo requieren superar problemas como la falta de precisión o la obstrucción de partes del cuerpo. Este trabajo presenta el uso de sensores RGB-D y Algoritmos Genéticos para optimizar el diseño de los puestos de trabajo. Se emplean los sensores RGB-D para capturar los movimientos de los trabajadores cuando alcanzan objetos en los bancos de trabajo. Los datos recopilados se emplean para optimizar el diseño de los puestos de trabajo mediante AGs considerando múltiples criterios ergonómicos. Los resultados muestran que los inconvenientes típicos del uso de sensores RGB-D para el rastreo del cuerpo no son un problema para esta aplicación, y que la combinación con algoritmos inteligentes puede automatizar el proceso de diseño. El método descrito puede usarse para sugerir automáticamente nuevos diseños cuando los trabajadores o procesos de producción cambian, adaptar los diseños a los trabajadores específicos en función de la forma en que éstos realizan sus tareas, o para obtener diseños simultáneamente optimizados para varios procesos de producción.

Palabras Clave: sensor RGB-D, diseño de puesto de trabajo, algoritmos genéticos.

4.1.2. Introducción

Los sensores RGB-D son dispositivos capaces de detectar la distancia a la que se encuentran los objetos presentes en una escena. Básicamente están compuestos por un trasmisor láser infrarrojo que proyecta un patrón de puntos sobre su entorno, y una cámara infrarroja capta el patrón proyectado. La información obtenida por la cámara infrarroja es comparada con patrones de referencia, permitiendo estimar la distancia a la que se encuentra cada pixel de la imagen respecto al sensor (Garcia and Zalevsky, 2007; Henry et al., 2012; Khoshelham and Elberink, 2012). Además, el dispositivo dispone de una cámara RGB-D

convencional, de forma que se añade información sobre su color a la información de la distancia de cada pixel.

Esta tecnología no es nueva, existen dispositivos capaces de captar la profundidad de una escena desde finales del siglo XX. Sin embargo, dos características de los nuevos sensores RGB-D han provocado que rápidamente su uso se haya extendido y que sean empleados en áreas muy diferentes. En primer lugar, los nuevos sensores RGB-D tienen un coste muy reducido en comparación con los dispositivos más antiguos (aproximadamente \$200 en 2016). En segundo lugar, estos nuevos sensores pueden ser empleados como sistema de captura de movimiento en 3D, dado que el software que los controla proporciona información sobre la posición de las articulaciones de los usuarios reconocidos presentes en la escena (datos del esqueleto) en tiempo casi real. Se deduce de los datos de profundidad la posición de las partes del cuerpo, empleando un AG aleatorio de decisión que ha aprendido con millones de ejemplos de entrenamiento (Han et al., 2013).

En 2010 Microsoft lanzó el sensor Kinect RGB-D. Simultáneamente aparecieron en el mercado otros sensores tales como el ASUS Xtion. Desde entonces, la disponibilidad en el mercado de sensores RGB-D fomentó el desarrollo de enfoques prometedores para problemas habituales en varias áreas, tales como el reconocimiento de objetos, reconstrucción 3D, realidad aumentada, procesado de imágenes, robótica, o interacción hombre-máquina. En el campo de la ergonomía las primeras investigaciones sobre los usos de los sensores RGB-D se centraron en analizar si la precisión de los datos obtenidos permitían emplearlos como dispositivos de captura de movimiento sin marcadores (Bonnechère et al., 2013a, 2013b; Clark et al., 2012, 2013; Destelle et al., 2014; Dutta, 2012; Fernández-Baena et al., 2012; Nixon et al., 2013; Obdržálek et al., 2012; Pfister et al., 2014). Los resultados de estos trabajos sugieren concluir que la precisión de los sensores es sólo ligeramente inferior a la de otros dispositivos más caros, pero lo suficientemente confiable para ser empleados para la evaluación postural. Otras investigaciones se enfocaron en el empleo de los sensores RGB-D en métodos de evaluación tradicionales de ergonomía tales como RULA (Haggag et al., 2013; Plantard et al., 2015), OWAS (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014) o la Ecuación de Levantamiento Manual de Cargas NIOSH (Patrizi et al., 2015; Spector et al., 2014).

Aunque los resultados de estas investigaciones parecen ser muy prometedores, y los sensores RGB-D pueden utilizarse como una herramienta para apoyar las tareas de los ergónomos, su tecnología aún no está lo suficientemente desarrollada como para reemplazar a las personas expertas, y algunos aspectos necesitan más investigación para usar sensores RGB-D en entornos reales de trabajo. Por ejemplo, estos dispositivos son un

buen sistema de rastreo cuando el sujeto está frente al sensor o está en el rango de $\pm 40^\circ$. En otros casos, la fiabilidad de los datos disminuye significativamente (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014). La obstrucción y la auto-obstrucción son también problemas importantes. Se infiere la posición de una articulación que no es visible por el sensor. Esta posición es calculada a partir de los datos de la articulación circundante a través de la captura directa (NUI, 2013), disminuyendo drásticamente la confiabilidad de los datos. Estas situaciones son muy comunes en entornos reales, donde el trabajador puede manejar objetos grandes que ocultan partes del cuerpo a la cámara, parte del cuerpo podría estar detrás de otra parte o, simplemente el trabajador se mueve fuera del campo de visión del sensor. Algunos investigadores tratan de resolver este problema empleando múltiples sensores orientados en diferentes ángulos con relación al sujeto rastreado (Berger et al., 2013). Por otro lado, el rastreo puede no obtener los datos cinemáticos del cuerpo inferior con precisión (Yang et al., 2015), y las rotaciones de las articulaciones no ser registradas correctamente, o no ser registradas en absoluto para los miembros periféricos o la cabeza. Además, los algoritmos de rastreo empleados generalmente pueden provocar que las longitudes de las extremidades del cuerpo no sea constantes a lo largo del tiempo (NUI, 2013).

En 2014 Microsoft lanzó una versión mejorada de Kinect. Kinect V.2 tiene una mejor resolución para el sensor de profundidad y su algoritmo de rastreo del esqueleto (llamado en esta versión rastreo del cuerpo) es capaz de rastrear más articulaciones del cuerpo. La comparación entre ambos sensores desarrollada por Xu and McGorry (2015) concluyó que la precisión en la identificación de la localización del centro de la articulación no mejora sustancialmente en la Kinect v2. Por lo tanto, dado el estado actual de esta tecnología, el empleo de los sensores RGB-D en cualquier entorno real debe considerar las limitaciones de estos dispositivos.

En este trabajo se presenta el empleo de sensores RGB-D (Microsoft Kinect™) y Algoritmos Genéticos (AGs) la reorganización automática de las áreas de trabajo con el objetivo de optimizar los alcances de los elementos de trabajo y los movimientos del trabajador. El método desarrollado permite obtener el diseño óptimo automatizado de los elementos presentes en el plano de trabajo basada en criterios ergonómicos y de producción. Para alcanzar este objetivo, un sensor RGB-D detecta los movimientos de las manos del trabajador al realizar alcances durante el desarrollo de su tarea. Los datos obtenidos por el sensor durante un cierto periodo de tiempo son empleados por un AG para obtener un diseño nuevo en base a los criterios establecidos inicialmente por el diseñador. El algoritmo considera, además, las restricciones geométricas impuestas por las dimensiones del plano de trabajo y de los elementos a distribuir sobre él. El procedimiento puede ser aplicado a

puestos de trabajo de montaje, puestos de trabajo de oficina, puestos de empaquetado de productos, puestos de trabajo en cajas de supermercados donde el trabajador está de pie, o a cualquier puesto en el que la actividad del trabajador se desarrolla sobre un plano de trabajo y en un área limitada. Los sensores RGB-D son apropiados para estas aplicaciones ya que sólo han de detectar la posición de las manos del trabajador; puede ser evitada la obstrucción colocando correctamente el sensor, el trabajador permanece todo el tiempo en el campo de visión de la cámara y está situado frente al sensor.

Además de obtener diseños óptimos a partir de los datos del sensor RGB-D, el sistema puede ser utilizado para un rastreo constante del puesto de trabajo, El AG analiza continuamente los datos del sensor para obtener nuevos diseños que se adapten mejor a los cambios en volúmenes o sistemas de producción, o a cambios en las posiciones de los trabajadores. De esta forma el sistema alertará a los ingenieros de producción cuando obtienen un nuevo diseño mejor adaptado a la nueva situación, quienes decidirán la conveniencia de implementarlo.

En los siguientes apartados se muestra el método desarrollado y se aplica a un caso de estudio en un puesto de montaje de pequeños componentes. En la sección 4.1.3. se describe este tipo de puestos y los criterios ergonómicos y productivos a considerar para su correcto diseño. La sección 4.1.4. muestra el empleo del sensor RGB-D para la recogida de los datos y cómo emplearlos en un AG para obtener el diseño óptimo en base a los datos del sensor. En la sección 4.1.5. se aplica el método propuesto a un caso de estudio. En la sección 4.1.6 se discuten los resultados y limitaciones de este enfoque. Finalmente, en la sección 4.1.7 se presentan algunas conclusiones.

4.1.3. Diseño de los puestos de montaje

En los puestos de trabajo de montaje, los trabajadores montan piezas de productos para obtener productos terminados o sub-montajes. Las piezas que deben ser montadas se encuentran en el entorno del trabajador, quien debe alcanzarlas y montarlas, siguiendo generalmente una secuencia determinada y empleando las herramientas adecuadas. Los puestos de trabajo de montaje pueden formar parte de una línea de montaje, o ser puestos independientes. Según el Departamento de Trabajo de los Estados Unidos, en 2015 existían 1.834.000 puestos de este tipo en ese país (Occupational Outlook Handbook, 2015). Aunque la tendencia general es automatizar el proceso de montaje, existen varios puestos de este tipo ocupados por personas debido a dificultades técnicas o al elevado coste de la automatización.

En los puestos de trabajo, un mal diseño de los elementos de trabajo (generalmente organizados sobre un banco de trabajo) dará como resultado una eficiencia baja, fatiga prematura, problemas de salud y errores (Sanders and McCormick, 1993). El diseñador debe determinar las mejores ubicaciones para los elementos de trabajo (piezas, herramientas, equipos, etc.) dentro del área de trabajo, teniendo en cuenta diferentes criterios, tanto productivos como ergonómicos, que pueden llegar a ser opuestos (Battini et al., 2011; Das and Sengupta, 1996; Deros et al., 2011; Saptari et al., 2011; Shikdar and Al-Hadhrami, 2012, 2007; Shikdar and Al-Kindi, 2007). Por este motivo, generalmente, los diseñadores usan técnicas inteligentes de cálculo tales como los AGs, redes neuronales, lógica difusa o sistemas basados en el conocimiento. Puede encontrarse una revisión de estas técnicas en el trabajo de Zha y Lim (2003).

De los estudios anteriormente mencionados, pueden extraerse unos principios de diseño ergonómicos fundamentales. Por ejemplo, los elementos de trabajo que frecuentemente se emplean deben mantenerse cerca del trabajador. Si los productos se deben montar en un orden específico, los elementos de trabajo que se usan de forma combinada o que están cerca en la secuencia de montaje, deben mantenerse juntos entre sí. Debe evitarse colocar elementos de trabajo en zonas que requieran un esfuerzo extra del trabajador para alcanzarlas; si no es posible evitarlo, se deben colocar en estas áreas los elementos de trabajo usados con menor frecuencia. Los elementos de trabajo más pesados deben colocarse en un área de acceso de fácil alcance que requiera un movimiento mínimo del operario, y no requiera flexión o rotación para moverse desde el punto de acceso al punto de instalación. Deben colocarse cerca del trabajador las piezas que requieren inspección, o las que requieren agarre de precisión. La zona de montaje de piezas y uso de herramientas debe estar directamente frente al trabajador, evitando el tiempo prolongado de trabajo en áreas que requieran rotación de cuello o tronco. Las piezas o herramientas que necesiten ser manejadas con la mano derecha o con la mano izquierda deben colocarse en la parte correspondiente del área de trabajo, evitando que las manos deban cruzar el plano sagital del trabajador para agarrarlas. Existen otros principios de diseño que pueden considerarse respecto a la colocación de los objetos a alcanzar en las áreas de trabajo normales y máximas (Das and Behara, 1995; Das and Sengupta, 1996).

Existen varias técnicas para obtener el diseño del puesto de trabajo (Zha, 2003). Como regla general, es necesario analizar el diseño de los elementos de trabajo en el puesto y los movimientos realizados por el trabajador en el desarrollo de su tarea. Se analizan los datos obtenidos empleando softwares específicos (Santos et al., 2007), sistemas CAD (Diseño Asistido por Computadora) y técnicas heurísticas o metaheurísticas (Zha, 2003) para obtener el mejor diseño. La captura de los alcances realizados por el trabajador puede

realizarse de diferentes formas. posteriormente, paso a paso filmando en video la tarea para analizarla (Shinde and Jadhav, 2012), empleando sistemas tridimensionales de captura de movimiento (Best and Begg, 2006) o sistemas de medición inercial (Brodie et al., 2008). En general, estos sistemas tienen una precisión limitada o son difíciles de usar en entornos reales debido a su complejidad, requerimientos de espacio y volumen, necesidad de realizar una inversión inicial considerable para comprar el equipo, altos costes de mantenimiento y necesidad de emplear personal técnico altamente capacitado (Trask and Mathiassen, 2012).

En los sistemas productivos actuales son frecuentes los cambios en el volumen de producción o el tipo de producto a fabricar para adaptarse a la demanda del mercado. Incluso se pueden procesar diferentes productos en el mismo puesto de trabajo. Por ello, se debe realizar el diseño del puesto considerando simultáneamente varios procesos productivos, o ser fácilmente adaptable a potenciales cambios en el proceso de fabricación. Además, un determinado puesto puede ser ocupado por varios trabajadores en diferentes turnos. Incluso si la secuencia de montaje es fija, existen diferencias antropométricas entre los operarios, así como diferentes formas de llevar a cabo cada tarea. Por ello, es aconsejable que el diseño del puesto tenga en cuenta a todos los trabajadores que lo ocupan, o incluso se establezcan diseños personalizados para cada trabajador. Incluso podrían ser aconsejables diseños específicos para trabajadores con problemas de salud determinados que requieran evitar ciertos movimientos.

Por este motivo, la simplificación de los procesos de toma de datos, análisis y obtención de diseños es adecuada. El empleo de sensores RGB-D para la toma de datos y metaheurísticas tales como los AG para el cálculo de los diseños óptimos, basados en los datos de los sensores permiten la automatización de este proceso. Además, este sistema tiene muy bajo coste, pocos requerimientos de espacio, costes de mantenimiento bajos y no requiere de personal altamente cualificado.

4.1.4. Algoritmos Genéticos para resolver problemas de diseño en planta

Obtener el mejor diseño de los ítems en el puesto de trabajo puede considerarse como un problema de diseño en planta (Facility Layout Problem) (FLP) (Kusiak and Heragu, 1987). Un FLP considera el diseño de un conjunto de elementos de áreas conocidas y desiguales, sin solapamiento, dentro de un área de dimensiones dadas de forma que los costes relativos a las interacciones entre los elementos se reduzcan al mínimo. Encontrar el diseño óptimo en los puestos de trabajo puede ser considerado un caso de FLP.

Resolver un FLP es común en varios tipos de problemas (diseño en planta, asignación de memoria, embalaje) (Drira et al., 2007; Dyckhoff, 1990; Islier, 1998). Cuando tanto el número de objetos a distribuir como el número de restricciones a considerar son elevados no es posible encontrar métodos precisos de resolución (Amaral, 2006). Por ello, es habitual emplear técnicas de recocido simulado (Saifullah Hussin and freistütze, 2014), búsqueda tabú (James et al., 2009), Algoritmos de Colonias de Hormigas (Hani et al., 2007; Jain and Sharma, 2005), Algoritmo Memético (Merz and Freisleben, 1999), optimización de una multitud de partículas (Önüt et al., 2008), Algoritmos Genéticos (Diego-Mas et al., 2009; El-Baz, 2004) o Redes Neuronales (Hasegawa et al., 2002; Zha, 2003).

Diversas técnicas para resolver el FLP, las basadas en AG han dado resultados satisfactorios (Srinivas and Patnaik, 1994), y dentro de este grupo, aquellos basados en la estructura de árbol de cortes (Tam, 1992), son eficientes en la búsqueda de soluciones geoméricamente aceptables. Los AGs realizan una búsqueda estocástica guiada basada en la evolución de un conjunto de estructuras (cromosomas), como ocurre en las especies naturales (Goldberg, 1989). El AG comienza con un conjunto de soluciones al problema (población inicial) representados mediante cromosomas (Conjunto finito) aleatoriamente generados. Cada cromosoma se evalúa empleando una función de aptitud para determinar su idoneidad con los requerimientos del problema. La población inicial experimenta varias transformaciones para generar un nuevo conjunto de soluciones que heredarán las mejores características de sus antecesores. Estas transformaciones son guiadas por algunos operadores genéticos (generalmente selección, cruce y mutación), que combinan o modifican los cromosomas que representan las soluciones. Este proceso se repite hasta que se alcanza un criterio de parada previamente establecido, por ejemplo, se alcanza un cierto número de iteraciones, o se han realizado determinado número de iteraciones sin alcanzar una nueva solución mejor.

Para que sea realmente aplicable el diseño obtenido, se deben respetar estrictamente las restricciones geométricas impuestas. Se consideran inaceptables las soluciones que no se ajusten a estos límites. Por este motivo, en este trabajo se propone el uso de AG sugerido en Diego-Mas et al. 2009. Este AG permite resolver problemas de distribución en planta con restricciones geométricas estrictas. Se puede consultar una descripción detallada de su funcionamiento en Diego-Mas et al. (2008). Este AG es principalmente destinado para optimizar distribuciones en plantas; sin embargo, es posible adaptarlo para que sea empleado en la optimización del diseño de puestos de trabajo, incluyendo en su función de aptitud nuevos términos que consideren criterios ergonómicos. La sección 4.1.5.3. mostrará cómo se ha sido modificada la función de aptitud para operar con la información recopilada de un sensor RGB-D, y para considerar criterios ergonómicos.

4.1.5. Materiales y Métodos

El sistema propuesto emplea un sensor RGB-D para detectar las posiciones de las manos del trabajador mientras realiza su tarea y un AG que obtiene el mejor diseño basándose en los criterios establecidos por el evaluador. Este proceso se desarrolla en tres etapas. La primera etapa implica la recogida de información sobre la tarea a analizar (por ejemplo, el número y dimensiones de los elementos de trabajo a distribuir y las dimensiones del área de trabajo). En la segunda etapa un sensor RGB-D detecta las posiciones de las manos del trabajador mientras lleva a cabo la tarea. Finalmente, se envía al AG la secuencia de movimientos de las manos, el cual calcula el mejor diseño del puesto de trabajo. Para controlar el sistema se desarrolló un software específico compuesto por tres módulos. El primero (módulo de datos) permite la recogida de la información sobre la tarea a analizar. El segundo (módulo de rastreo) controla el sensor RGB-D y almacena la secuencia de movimientos. El tercero (módulo de cálculo) implementa el AG para obtener el diseño óptimo.

4.1.5.1. Configuración del Sistema

El sistema debe conocer cierta información sobre el puesto que se está analizando. Esta información se introduce en el primer módulo del software. La información se refiere a las dimensiones del área de trabajo y a los elementos que deben distribuirse en ella. El área de trabajo es la zona en la que el trabajador desarrolla su tarea y en la que se distribuirán los diferentes elementos. Generalmente coincide con las dimensiones del banco de trabajo. Los datos necesarios del área de trabajo son su anchura (**W**) y altura o profundidad (**H**).

Los elementos a distribuir (que en adelante denominaremos *ítems*) son los diferentes elementos que ocupan espacio en el área de trabajo. Los ítems pueden ser piezas, cajones, herramientas o cualquier espacio destinado a que el trabajador desarrolle algún tipo de actividad. El número de ítems a distribuir se denominará **n**. Las áreas ocupadas por los ítems son el espacio requerido para que la actividad asociada a ellos pueda desarrollarse normalmente. Se considera que las áreas de los ítems tienen forma rectangular y geometría flexible, lo que significa que la ratio geométrica (la profundidad dividida entre la anchura) del área asignada a cada ítem puede variar dentro de ciertos márgenes (restricciones geométricas).

Denominaremos **a_i** al área ocupada por cada ítem **i**, y **r_{min_i}** y **r_{max_i}** a las ratios geométricas mínima y máxima permitidas para cada ítem **i**. En la Figura 1 se muestran las formas que puede adoptar un ítem de geometría flexible; el área del ítem se mantiene constante mientras la relación entre la profundidad y la anchura del ítem varía entre ciertos límites (**r_{min}** y **r_{max}**). Al definir la ratio geométrica permitida para un ítem debe considerarse ciertas

actividades que requieren de una orientación determinada. Por ejemplo, en la Figura 1 puede observarse que con ratios inferiores a 1 en la orientación de los ítems será horizontal, mientras que ratios superiores a 1 permiten orientaciones verticales.

Por último, se proporcionará información respecto a la posición de cada ítem en el diseño inicial, es decir, el existente en el momento de la toma de datos. Así, para cada ítem i , se calculan las coordenadas de dos vértices opuestos del rectángulo ocupado por el ítem. En la Figura 2 se muestran esos vértices ($[x_1, y_1]$, $[x_2, y_2]$) para uno de los ítems.

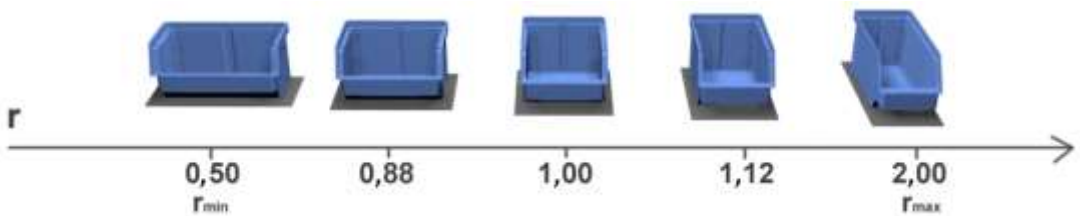


Figura 1. Rango de variación de la forma de un elemento dados en las ratios geométricas mínima y máxima.

4.1.5.2. Configuración del sensor

El sensor empleado en este trabajo fue Microsoft Kinect. Este sensor RGB-D calcula las posiciones de las articulaciones transformando las coordenadas en una matriz de datos. Los ejes x , y y z corresponden a los ejes del sensor de profundidad. Este sistema de coordenadas diestro sitúa al sensor en el origen con el eje positivo Z extendiéndose en la dirección de la cámara del sensor. El eje y positivo se extiende hacia arriba, y el eje x positivo se extiende hacia la izquierda (NUI, 2013).

El sensor RGB-D debe ser colocado en una posición donde sean visibles las extremidades superiores del trabajador, evitando la obstrucción debido a la presencia de objetos en el puesto (Figura 2). El sensor se colocará lo más cercano posible al plano sagital del trabajador o en un rango de $\pm 40^\circ$ (Diego-Mas and Alcaide-Marzal, 2014). En esta configuración es improbable que los miembros inferiores sean detectados por el sensor, pero para esta evaluación únicamente es necesario obtener información sobre los miembros superiores.

A partir de la información de las posiciones de los ítems en el plano de trabajo, el software de control del sensor define un prisma rectangular para cada ítem. La base de cada prisma es la superficie ocupada por el ítem, y su altura es un parámetro (h), que puede ser el mismo para todos los ítems o distinto en función de la altura de los objetos que ocupan esa posición del plano de trabajo (Figura 2). A estos prismas se les denomina Sensores Virtuales

(SV), y quedan definidos por las coordenadas de sus vértices en el sistema de coordenadas del sensor.

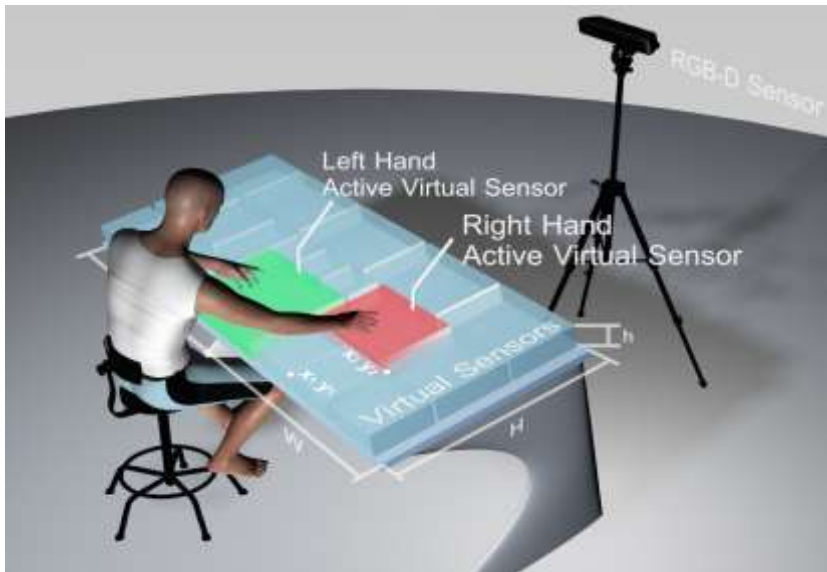


Figura 2. Vista esquemática de la configuración del sistema de captura de movimiento.

Durante la captura de datos el sensor determina las posiciones de las manos del trabajador. El algoritmo de rastreo del esqueleto Kinect V1 es capaz de monitorear dos articulaciones de la mano, una en la muñeca y otra en el centro de la palma. Kinect V2 ha introducido dos articulaciones nuevas de la mano (falanges de los dedos y pulgar). El software de control del sensor puede emplear cualquiera de estas articulaciones para detectar la posición de la mano. En este trabajo se emplearon las articulaciones centradas en el centro de la palma de la mano obteniendo resultados satisfactorios.

Cuando la secuencia de movimientos del trabajador varía (por ejemplo, cuando la secuencia de montaje no es fija) es adecuado capturar datos de varios ciclos de trabajo. De esta forma se puede obtener un diseño adecuada considerando las variaciones de la secuencia de movimientos. Cuando la secuencia de movimientos es fija es suficiente obtener datos de un solo ciclo.

Cuando las coordenadas de la posición de una mano se encuentran en el interior de un SV se registra un evento que indica el tiempo, la mano (izquierda o derecha) y qué SV ha sido activado. Durante el acceso a un ítem particular, por ejemplo, para agarrar una herramienta, la mano del trabajador puede pasar a través de otros ítems. Para prevenir la

grabación de estos ítems intermedios, el software solamente captura el evento si la mano se mantiene dentro del **SV** por un periodo más largo que un umbral de tiempo (**th**).

Situando el sensor en una posición adecuada es improbable que existan obstrucciones de los miembros superiores. Sin embargo, el trabajador debe manipular objetos con las manos durante su tarea. El algoritmo de monitoreo del cuerpo de Kinect tiene limitaciones para detectar articulaciones de las manos cuando se manipulan objetos. El sensor no puede hacer rastreo a la posición de las manos si el objeto manipulado es grande. Como hipótesis del trabajo, no hay objetos grandes que deban ser manipulados en el puesto de trabajo seleccionado.

Adicionalmente, es difícil hacer rastreo a las manos cuando sus posiciones están muy cercanas a la superficie de la mesa. Para resolver este problema el parámetro t_h y la altura (**h**) del **SV** deben ser cuidadosamente definidas por el evaluador. El sistema propuesto solo necesita detectar el momento en que la mano alcanza el **SV** y se mantiene en su interior durante un periodo de tiempo superior a t_h . Generalmente cuando un trabajador debe recoger un objeto ubicado en un **SV** dado, no se encuentra transportando otro objeto en su mano. Para asegurar la detección antes de que sea recogido el objeto, la altura del **SV** debe ser mayor que la del objeto. De esta forma la mano está libre de objetos y no se encuentra en contacto con la superficie de trabajo cuando entra al **SV**, asegurando por lo tanto que, el sistema detecta apropiadamente el acceso al correspondiente **SV**. El punto importante aquí consiste en establecer un valor apropiado t_h . Preferiblemente, t_h debe ser pequeño, facilitando detectar que la mano del trabajador se haya mantenido el tiempo suficiente dentro del **SV** establecido. Sin embargo, si t_h es muy pequeño, otros **SV** que se hayan cruzado durante el movimiento de la mano para alcanzar el **SV** establecido, pueden ser detectados causando falsos positivos.

Llevar a cabo algunas pruebas en el puesto de trabajo analizado ayuda a establecer el valor t_h apropiado. En las pruebas, una vez la mano toca el objeto ubicado dentro del **SV**, y dependiendo del tamaño del objeto, el sensor puede inferir la posición de la mano empleando posiciones anteriores y las posiciones de las articulaciones que se encuentren alrededor. Si la posición inferida se encuentra dentro del **SV**, se alcanzará fácilmente el valor t_h sin utilizar un valor muy pequeño y evitando falsos positivos.

Finalmente, se debe establecer el valor de t_h teniendo la frecuencia a la que el sensor RGB-D captura las posiciones de las manos. Kinect obtiene imágenes de profundidad a una velocidad de hasta 30 imágenes por segundo. Sin embargo, el procesado de datos para detectar si las manos están dentro de **SV** consume mucho tiempo. Por lo tanto, la frecuencia de adquisición de datos y de procesado de imágenes depende del número de

capturas **SV**. Obviamente t_u debe ser mayor al tiempo transcurrido entre dos imágenes consecutivas (preferiblemente debe haber varias imágenes en un periodo t_n).

4.1.5.3. Proceso de cálculo

Finalizado el tiempo establecido para la toma de datos mediante el sensor RGB-D, la información obtenida es enviada al módulo de cálculo para ser usada por el AG. La información consiste en dos series, una con los datos de la mano derecha y otra con los datos de la izquierda. Las series están compuestas por tantas columnas como **SV** fueron activados durante el periodo de observación, y tres filas. La primera fila indica el código del **SV**, la segunda fila indica el tiempo en el que es activado contado desde el principio del periodo de observación, y la tercera fila indica el tiempo en el que se desactiva el **SV**. Esta información permite conocer las veces que una mano del trabajador accedió a un ítem y las veces que se movió la mano del trabajador de un ítem a otro.

Como se mencionó en la sección 4.1.4., en un AG se evalúa cada cromosoma empleando una función de aptitud (o función de coste) para determinar su idoneidad con respecto a los requerimientos del problema. De esta manera, en este caso, es necesario identificar los criterios para medir la calidad del diseño en un puesto de trabajo e incluirlo en la función de aptitud. Como se indicó en la sección 4.1.3., pueden considerarse varios criterios. Aquellos a ser considerados en un caso particular dependen de las características del puesto de trabajo y de la tarea desempeñada, de tal manera, que el evaluador debe determinar los criterios más adecuados para cada problema particular e incluirlos en la función de aptitud. De forma general, una función para medir el coste (C) de un diseño en el AG propuesto en Diego-Mas et al. (2009) puede tener la forma de la Ecuación 1 (Diego-Mas et al., 2009) en la que n es el número de ítems a distribuir.

Ecuación 1.

$$C = Cr \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} r_{ij} + Cg \sum_{i=1}^n ig_i$$

En el segundo miembro de la Ecuación 1 hay dos términos. El primer término (denominado Coste Relacional) mide el coste derivado de la distancia entre los ítems. Este coste depende de la distancia entre los ítems en el diseño obtenido (d_{ij}) y la relación existente entre ellos (r_{ij}). Aunque existen otras posibilidades (Tompkins et al., 2010), la distancia suele medirse como la distancia euclidiana entre los centros geométricos de los ítems. La relación r_{ij} mide la necesidad de cercanía entre dos ítems. Por ejemplo, r_{ij} debe ser mayor cuantas más veces la mano del trabajador pasa del ítem i al ítem j (información que es obtenida directamente del sensor RGB-D). Además, su valor puede ser mayor si los objetos manipulados entre los ítems son pesados o si requiere un manejo cuidadoso. Así pues, el

primer término de la Ecuación 1 penaliza aquellos diseños en los que los ítems de acceso frecuente se encuentran lejos del trabajador, especialmente si son objetos pesados o requieren manipulación especial. Este término minimiza la distancia recorrida por las manos del trabajador y la energía necesaria para llevar a cabo la tarea.

El segundo término de la Ecuación 1 (Coste Geométrico) mide el grado de cumplimiento de las restricciones geométricas de los ítems en el diseño obtenido. El valor de ig_i es 0 si la ratio geométrica de una actividad i está dentro del intervalo $[r_{min_i}, r_{max_i}]$. De no ser así, su valor aumenta proporcionalmente a la distancia al extremo más cercano de ese intervalo. Cr y Cg son coeficientes de ponderación de cada uno de los términos de la ecuación de coste, y permiten asignar mayor o menor peso a cada criterio.

Estos dos términos (Coste Relacional y Geométrico) deben siempre estar presentes en la función de aptitud del AG propuesto (Diego-Mas et al., 2009). Sin embargo, el diseñador puede añadir tantos términos como sean necesarios a la Ecuación 1 para considerar otros criterios ergonómicos.

4.1.6. Aplicación experimental

Para verificar el funcionamiento del sistema propuesto, se llevó a cabo un experimento en un puesto de trabajo de montaje de una fábrica de juguetes. En el puesto seleccionado, en este puesto se montan pequeñas piezas y sub-montajes empleando diferentes tipos de herramientas. Todas las piezas a montar y las herramientas necesarias estaban distribuidas en un banco de trabajo. La secuencia de montaje de las piezas era fija, realizándose siempre en el mismo orden. En la Figura 5a se muestra el diseño inicial de los ítems en el área de trabajo.

Antes de realizar el análisis se observó el puesto durante varios ciclos de trabajo. El tiempo medio de ciclo de montaje medido fue de 380,2 segundos con ligeras desviaciones de algunos segundos en algunos ciclos. Se analizó la disposición de los ítems y las áreas requeridas por éstos, y se establecieron las ratios geométricas mínimas y máximas de dichas áreas. Para establecer las ratios máxima y mínima se consultó al equipo de ingeniería de la planta. Además, se determinó qué ítems debían estar a la izquierda o la derecha del trabajador por ser empleados o alcanzados preferentemente por una de las manos. Como resultado de este análisis se obtuvo un listado de 20 ítems a distribuir (identificados con números del 1 al 20) cuyas características se describen en la Tabla 5. Las dimensiones del área de trabajo eran $W=157,0$ y $H=73,1$ centímetros respectivamente.

La segunda columna de la Tabla 5 indica el área de cada ítem. Las siguientes tres columnas muestran la ratio mínima y máxima establecida para cada ítem, así como la ratio en el

diseño inicial del puesto. La sexta columna muestra el lado en el que debía situarse preferiblemente el ítem. Las columnas octava y novena indican si el objeto manipulado era pesado y si la manipulación requería precisión. Los asteriscos en la tercera columna de la Tabla 5 indican si se consideró el ítem de orientación libre. Se considera que un ítem cumple sus restricciones geométricas cuando su ratio está en el intervalo entre la mínima y la máxima. En el caso de un ítem de orientación libre se considera válido también el intervalo simétrico respecto a 1, es decir $[1/r_{max}, 1/r_{min}]$. Por ejemplo, en el caso del ítem 3 la validez de la ratio fue entre $[0,50, 0,80]$. Al ser considerado de orientación libre las ratios comprendidas entre $[1,25, 2,00]$ también se consideraron válidas.

Ítem ID	Área (m ²)	Ratio			Lado preferido	Cuenta de acceso	Ítem pesado	Precisión requerida	r _{ij}
		Inicial	mínima	máxima					
1	0,1476	0,65	0,40	0,8	Centro	1	No	No	-
2	0,0682	1,41	0,60	1,66	Derecho	2	No	No	0,4
3	0,1342	1,38*	0,50	0,80	Izquierdo	2	No	No	0,8
4	0,0517	1,07	0,33	1,23	Derecho	3	No	No	0,8
5	0,0359	0,37	0,33	0,66	Indiferente	2	No	Si	1,6
6	0,0799	0,69*	0,57	0,75	Indiferente	3	No	No	0,8
7	0,0320	1,73	0,50	2,00	Derecho	5	No	Si	1,6
8	0,0341	0,70	0,57	1,72	Derecho	1	Si	Si	2,6
9	0,0341	0,70*	0,57	1,72	Indiferente	4	No	No	0,4
10	0,0343	0,71*	0,50	0,80	Izquierdo	4	Si	No	2,2
11	0,0341	0,70*	0,57	0,92	Derecho	2	No	No	2,0
12	0,0378	2,54*	0,30	0,75	Indiferente	3	No	No	0,8
13	0,0260	0,54*	0,42	0,75	Indiferente	1	No	Si	1,6
14	0,0804	0,69	0,57	0,92	Derecho	1	No	No	0,4
15	0,0664	1,37*	0,42	0,92	Indiferente	4	No	No	0,4
16	0,0216	1,60*	0,32	0,75	Izquierdo	5	No	No	1,6
17	0,0335	1,03	0,80	1,25	Derecho	2	No	No	2,0
18	0,0577	0,60*	0,50	0,80	Derecho	2	No	Si	1,2
19	0,0815	0,42*	0,37	0,90	Derecho	1	No	No	0,8
20	0,0569	0,61	0,50	1,94	Izquierdo	1	No	No	0,4

Tabla 5. Características de los ítems a distribuir.

Se empleó un sensor Kinect y un ordenador de sobremesa con un procesador de 3,6 GHz y 12 GB de memoria RAM para analizar 10 ciclos de trabajo consecutivos (Figura 3). Tras

realizar algunas pruebas, se estableció la altura de todos los **SV** (**h**) en 35 cm y **t_h** en 0,3 segundos. Dado que el orden en el que debía realizarse el montaje era fijo, la secuencia de activación de los **SV** fue igual en todos los ciclos existiendo pequeñas diferencias en los tiempos de activación. Por ello, en lugar de emplear los datos de los 10 ciclos, se analizó un solo ciclo con los tiempos de activación medios de los 10 ciclos. En la Figura 4 se muestran la secuencia de activación de los **SV** y los tiempos medios de activación. en la séptima columna de la Tabla 5 se muestra el número de veces que se activó cada **SV**.

Como se ha mencionado en la sección 4.1.5.3. se debe adaptar la función de aptitud del AG a las características del puesto de trabajo y de la tarea desempeñada. En este caso dos términos fueron añadidos a la Ecuación 1 para incluir dos criterios ergonómicos, dando lugar a la Ecuación 2, la cual fue empleada como función de aptitud. Además del Coste Relacional y el Coste Geométrico presentado en la Ecuación 1, en la Ecuación 2 existen dos términos más.

Se le denominó Coste Posicional al tercer término de la Ecuación 2. Cuando se analiza un puesto de trabajo el evaluador debe establecer el lado más apropiado para cada ítem. Si un objeto se alcanza o se utiliza generalmente con la mano derecha, es conveniente ubicarlo al lado derecho del trabajador. En este término, **d_i** depende de la distancia del centro del ítem **i** a un eje que divide el plano de trabajo en dos mitades iguales, izquierda y derecha (en la Figura 5). **d_i** toma el valor 0 si queda colocado el centro del ítem **i** en el lado preferente (Tabla 5) del eje. En otros casos, **d_i** toma el valor de la distancia del centro del ítem **i** al eje. De esta forma aquellos diseños donde se colocan los ítems en el lado preferente tienen un menor Coste Posicional. En la medida que el diseño incumple estas condiciones, se incrementa el Coste Posicional. Si un diseño cumple con todas las condiciones posicionales, el Coste Posicional se convierte en 0.

En ocasiones es recomendable que algunos ítems queden situados en posiciones específicas en el diseño. Por ejemplo, en este caso, el ítem 1 era la zona que el trabajador empleaba para realizar operaciones de montaje. El trabajador alcanzaba las piezas y herramientas del resto de ítems y realizaba las operaciones en la zona definida por el ítem 1. Por este motivo es necesario que el ítem 1 esté situado frente al trabajador. Para lograrlo, se introdujo el último término de la Ecuación 2 al que se denominó Coste Fijo. En este término **dp₁** toma el valor 0 si el centro del ítem 1 está en el eje **E** y uno de sus lados coincide con el borde del área de trabajo. En caso de no cumplirse estas condiciones **dp₁** toma el valor 1.

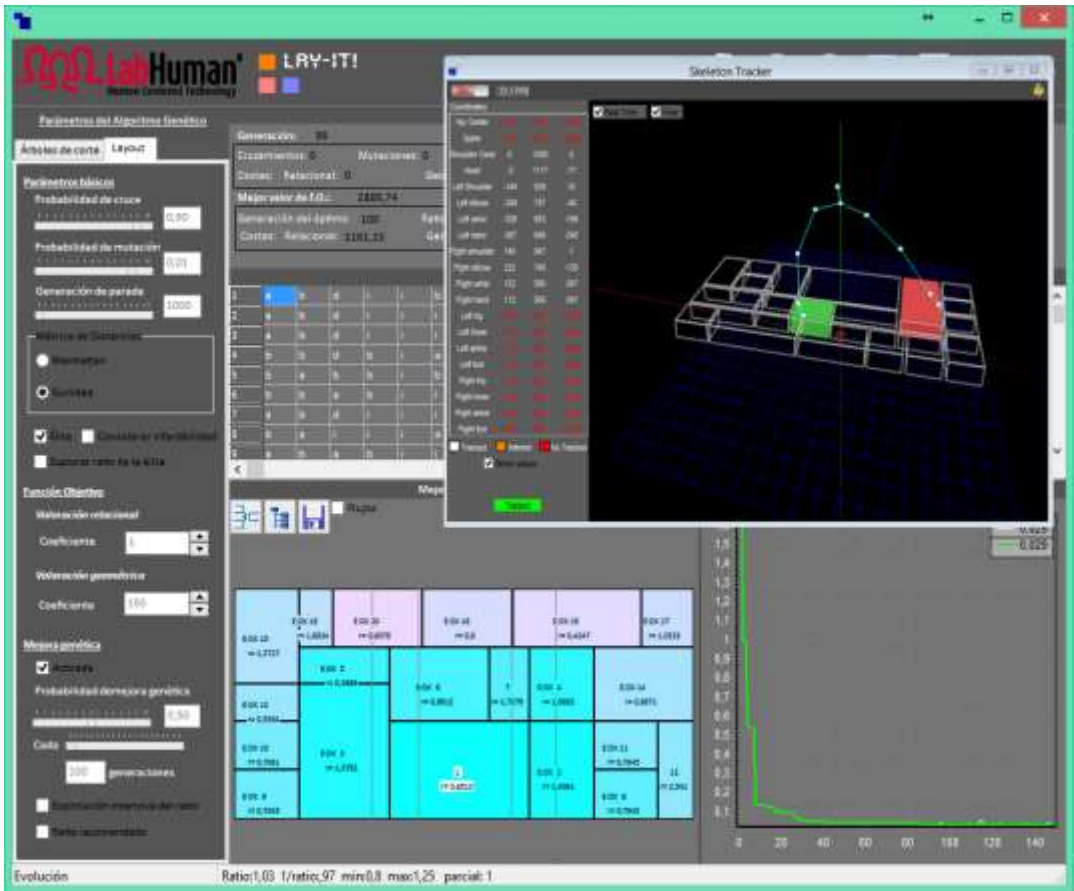


Figura 3. Las manos derecha e izquierda activan dos sensores virtuales en el módulo de rastreo.

Finalmente, se consideró si era necesario manipular objetos pesados y si la manipulación requería precisión (Tabla 5). Para calcular cada r_{ij} se empleó la Ecuación 3. En ella Acc_{ij} es el número de veces que las manos se movían del ítem i al j . H_{ij} toma el valor 1 si se manipulan objetos pesados y 0 en otro caso, y P_{ij} toma los mismos valores dependiendo de si la manipulación requería precisión o no. En la Ecuación 3 Ca , Cw y Cp son coeficientes de ponderación. En este caso de estudio se les asignó los valores 0,4, 0,2 y 0,4 respectivamente. Dado que los objetos manipulados en el puesto no eran excesivamente pesados se consideró adecuado asignar un valor menor al coeficiente Cw . Todos los movimientos en el puesto objeto de estudio empezaron o acabaron en el ítem 1 (la zona de ensamblaje frente al operario), por lo que r_{ij} tomó el valor 0 excepto cuando i o j eran igual a 1. Estos valores se muestran en la última columna de la Tabla 5. Se les asignó los valores 1, 150, 10 y 200 respectivamente a los coeficientes Cr , Cg , Cs y $C1$ de la Ecuación 2. Se fijaron los valores de estos coeficientes considerando el rango de valores absolutos en el que podía variar cada coste y la importancia relativa de cada uno de ellos.

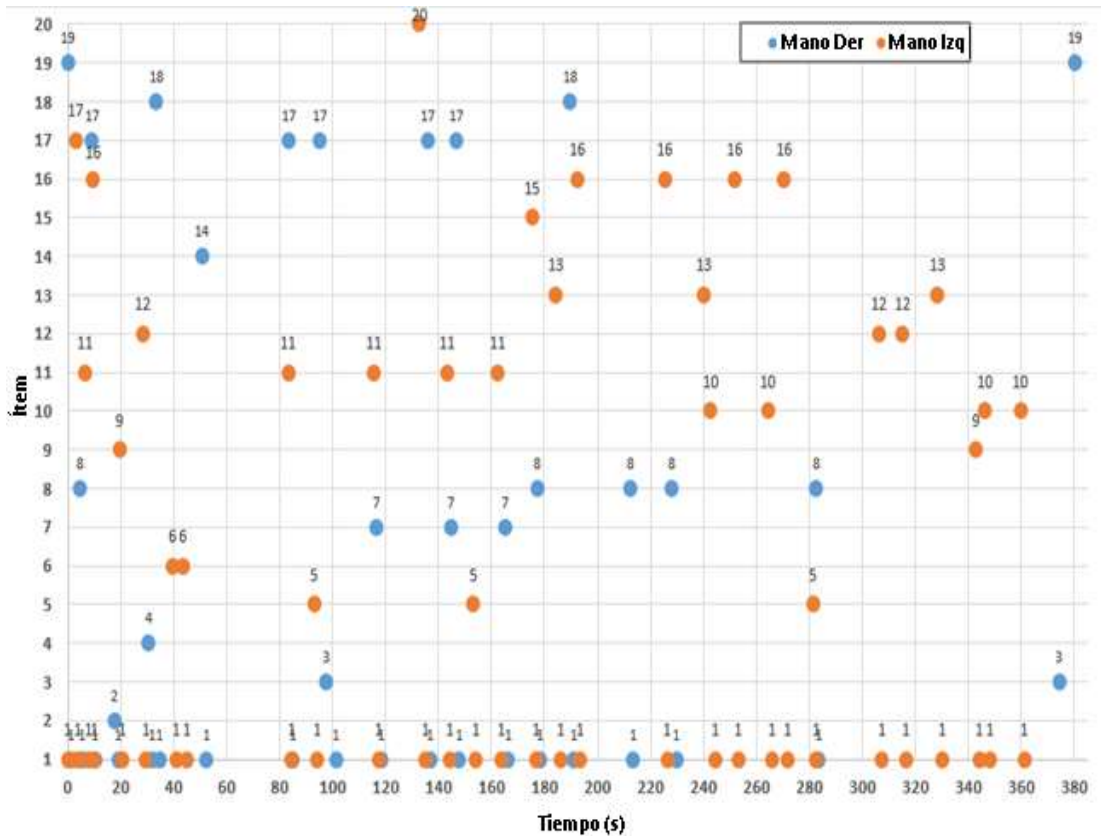


Figura 4. Secuencia de activación de los sensores virtuales y tiempos de activación promedio.

Ecuación 2.
$$C = Cr \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} r_{ij} + Cg \sum_{i=1}^n ig_i + Cs \sum_{i=1}^n d_i + C1 dp_1$$

Ecuación 3.
$$r_{ij} = Ca \cdot Acc_{ij} + Cw \cdot Hij + Cp P_{ij}$$

4.1.6.1. Sensibilidad del método a las variaciones de parámetros.

En el método presentado el evaluador debe definir el parámetro t_h y la altura (h) del **SV**. Si el valor t_h es demasiado pequeño pueden presentarse falsos positivos cuando la mano cruza otros **SV** para alcanzar el **SV** deseado (objetivo). Por otro lado, si el valor es demasiado grande, puede no ser detectado el acceso a algunos ítems. Por definición, el valor h en cada **SV** debe ser mayor a la altura del mismo. En el experimento realizado se empleó el mismo valor (35 cm). Este valor fue 15 cm mayor que la altura del ítem más alto. Para establecer la solidez de este método a las variaciones de t_h y h , se modificaron los valores de estos parámetros y se recalculó la secuencia de activación del **SV** para cada combinación de parámetros.

Se varió t_h entre 0,1 y 1,0 s con incrementos de 0,1 s. Para cada uno de estos valores de t_h , h tomó los valores 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 cm. La solución obtenida por el AG depende únicamente de la secuencia de activación del **SV**, por lo que, si no hay cambios en la secuencia de activación tampoco los habrá en la solución final. Se registró la actividad del trabajador durante el desarrollo de la tarea empleando Kinect Studio 2.0. Así, no fue necesario capturar los datos cada vez, para cada combinación de parámetros

4.1.7. Resultados

El AG empleado en este trabajo fue un AG en dos fases (Diego-Mas et al., 2009). Fueron ejecutadas ambas fases durante 1.000 generaciones. Fueron establecidas las probabilidades de cruce y mutación en 0,9 y 0,01 respectivamente, y el tamaño de la población fue 50. El tiempo empleado por el módulo de cálculo del software en un ordenador de sobremesa con procesador 3,6 GHz y 12 GB de memoria RAM fue de 4 minutos y 20 segundos.

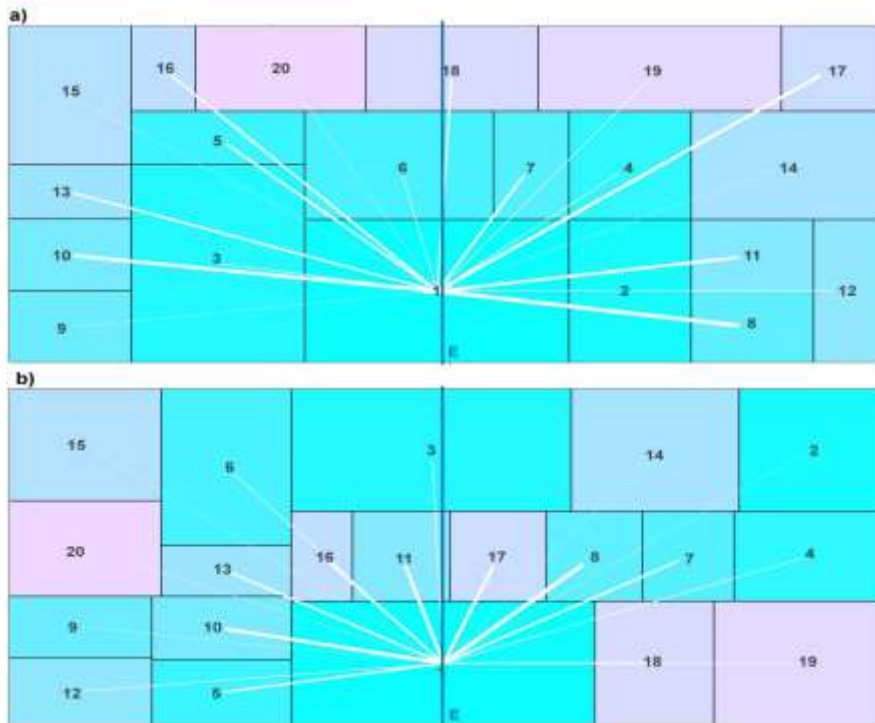


Figura 5. Diseño del puesto de trabajo inicial (a) y optimizado (b). El grosor de las líneas blancas es proporcional a las relaciones entre las áreas vinculadas.

En la Figura 5b se muestra el mejor diseño obtenido por el AG. El coste de este diseño, calculado con la Ecuación 2, es de 977,51. En esta solución todos los ítems están situados

en el lado preferido para facilitar el acceso al trabajador con la mano adecuada, y se respetan las restricciones geométricas de todos los ítems. Además, el ítem 1 queda situado frente a la posición que ocupa el trabajador. Así pues, los Costes Geométricos, Posicionales y Fijos de la solución obtenida valen 0, y el Coste Global de la solución es debido al Coste Relacional.

El grosor de las líneas blancas de la Figura 5 es proporcional al grado de relación entre las actividades que se unen dichas líneas. Los ítems unidos por líneas más gruesas requieren una mayor cercanía. En el diseño obtenido por el AG, la longitud de las líneas más gruesas es menor que en el diseño inicial. El Coste Relacional del diseño inicial fue 1315,65; así pues, la solución obtenida consiguió una disminución del 25,76%. Por otra parte, en la solución obtenida el Coste Posicional es 0, mientras que en el diseño inicial existieron ítems situados en el lado inadecuado.

4.1.7.1. Resultados del Análisis de Sensibilidad

Cuando se establecen los valores t_h y h incorrectamente se pueden cometer dos errores: no detectar el acceso a un **SV** que la mano del trabajador realmente alcanza (accesos a **SV** no detectados en la Tabla 6) y detectar el acceso a un **SV** cuando la mano cruza por otros **SV** para alcanzar el **SV** deseado (falsos positivos en la Tabla 6). La Tabla 6 presenta el número de errores de cada clase para cada combinación de parámetros. Fue calculado el número de errores comparando cada secuencia obtenida con la secuencia original. La secuencia original se había revisado previamente para asegurar que estuviera libre de errores. El único valor h que cambia la secuencia de activación es 20 cm. Por esta razón fueron agrupados los resultados en dos intervalos para el valor h (20 cm y el resto de valores).

4.1.8. Discusión

El empleo de sensores RGB-D como sistemas de captura de movimiento en 3D en el área de la ergonomía es prometedor. Los algoritmos de rastreo de estos dispositivos automáticamente registran las posiciones del cuerpo a una frecuencia alta de muestreo sin las desventajas de otros sistemas basados en marcadores colocados sobre la piel o sensores inerciales (coste, tiempos de instalación, personal técnico cualificado, disconfort) (Clark et al., 2012). Sin embargo, esta tecnología debe desarrollarse más para poder ser empleada de forma generalizada en entornos reales de trabajo. Es necesario solucionar problemas como la posición del sensor, ubicándolo de frente al trabajador o la falta de precisión cuando una parte de su cuerpo queda oculta por un objeto u otra parte del cuerpo. Estudios recientes tratan de solucionar estos problemas mediante el empleo simultáneo de varios sensores colocados en posiciones distintas (Asteriadis et al., 2013; Berger et al., 2013; Geiselhart et al., 2016; Zhang et al., 2012). Sin embargo, el empleo de

varios sensores debe afrontar problemas como las interferencias en los patrones de puntos proyectados sobre la escena o las diferencias en las posiciones de las articulaciones rastreadas de cada sensor (Sarbolandi et al., 2015). Además, la precisión de los datos de la parte inferior del cuerpo es baja (Yang et al., 2015), y no se capturan correctamente las rotaciones de las articulaciones, o no se capturan en absoluto, para los miembros periféricos o la cabeza.

Valores t_n (s.)	Valor de h (cm.)	Accesos a VS no detectados	Falsos positivos
0,1	20	1	4
	Resto de Valores	0	4
0,2	20	1	1
	Resto de Valores	0	1
0,3	20	1	0
	Resto de Valores	0	0
0,4	20	1	0
	Resto de Valores	0	0
0,5	20	1	0
	Resto de Valores	0	0
0,6	20	1	0
	Resto de Valores	0	0
0,7	20	2	0
	Resto de Valores	1	0
0,8	20	4	0
	Resto de Valores	3	0
0,9	20	5	0
	Resto de Valores	4	0
1,0	20	7	0
	Resto de Valores	6	0

Tabla 6. Resultados del Análisis de Sensibilidad

En este trabajo se han empleado sensores RGB-D en la optimización de la configuración de los elementos en los puestos de trabajo. En esta propuesta se han considerado las limitaciones actuales de los sensores y los algoritmos de rastreo. El nivel de desarrollo actual de los sensores RGB-D es suficiente para automatizar este proceso dado que sólo es necesaria la captura de las posiciones de los miembros superiores, eliminar el área de trabajo es limitada, y que es posible mantener el sensor en una posición adecuada respecto al trabajador. El sistema presentado combina los datos obtenidos por el sensor con AGs para la resolución de FLP. De esta forma el sistema es capaz de obtener del problema diseños simultáneamente adaptados a varios trabajadores o generar a varios procesos de

producción en el mismo puesto. Además, el sistema puede proponer automáticamente nuevos diseños cuando varían los movimientos realizados por los trabajadores. Y dado que los algoritmos de rastreo pueden captar simultáneamente varios trabajadores, el sistema puede adaptarse para el diseño de puestos de trabajo para la interacción grupal (Mahoney et al., 2015).

Se pueden emplear distintos tipos de sensores para detectar las posiciones de las manos (sistemas de captura de movimiento, sensores inerciales, detectores de presencia ubicados en el área de trabajo). Estos dispositivos son capaces de detectar las posiciones de las manos de manera más precisa que los sensores RGB-D. Sin embargo, la precisión no es una gran ventaja en esta aplicación porque solo se necesita detectar si las manos están dentro o fuera de los sensores virtuales. Utilizar sensores RGB-D es menos invasivo, de coste bajo y no requiere procesos de calibración complejos. Así pues, aunque para propósitos de investigación pueden ser preferidos otros métodos, los sensores RGB-D son apropiados para utilizarse en entornos reales de trabajo en los que la movilidad, la usabilidad y el bajo coste son críticos.

Debe realizarse La optimización de la configuración de los elementos de trabajo considerando criterios productivos y ergonómicos. Existe una gran cantidad de criterios ergonómicos que es posible considerar y la elección de los mismos depende del tipo de tarea y de los objetivos perseguidos. El sistema propuesto es flexible porque permite a los diseñadores considerar tantos criterios como se considere conveniente. El AG empleado para optimizar el diseño del puesto de trabajo emplea una función de coste (Ecuación 2) que puede modificarse introduciendo nuevos términos para considerar otros criterios. Por ejemplo, en este trabajo sólo se ha considerado la posición de las manos del trabajador. Aunque esta información es suficiente para este caso de estudio, puede resultar interesante considerar la posición de otras articulaciones. Por ejemplo, si se rastrea la posición de los hombros y los codos durante el desarrollo de la tarea, puede calcularse el ángulo de abducción de los brazos y usarse como criterio.

Las pruebas realizadas han permitido detectar ciertas limitaciones en el sistema. Por ejemplo, el manejo de objetos muy grandes puede impedir que sea correctamente detectada la posición de las manos. Así pues, el método descrito es apropiado para puestos de trabajo donde se montan piezas pequeñas. En este caso de estudio el empleado manejaba piezas y herramientas pequeñas, por lo que este problema no ocurrió. Sin embargo, al realizar pruebas con objetos más voluminosos, la posición de las manos fue inferida, o no rastreada. Aunque la precisión de la posición inferida era suficiente para activar el **SV** adecuado, esto puede ser un problema importante si el tamaño del **SV** es

pequeño. De forma similar, cuando las manos se encuentran muy cerca del plano de trabajo el número de posiciones inferidas aumenta. Esto ocurre fundamentalmente cuando el ángulo entre la línea de visión del sensor y el plano de trabajo es muy grande (sensor muy elevado respecto al plano de trabajo) o, por otro lado, cuando su posición está demasiado cerca de dicho plano. Cuando el plano de trabajo es horizontal o su ángulo respecto a la horizontal es pequeño, puede solucionarse este problema con una colocación adecuada del sensor RGB-D y una definición adecuada de t_h . Sin embargo, cuando el ángulo del plano de trabajo con la horizontal es grande puede ser difícil encontrar una posición adecuada para colocar el sensor.

Los sensores RGB-D cometen errores de medición no despreciables. Para solucionar este problema, deben ser correctamente establecidos por el evaluador algunos parámetros del método presentado (t_h y h). Para medir la solidez de este método cuando estos parámetros cambian, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad. t_h y h fueron modificados en los intervalos $[0,1, 1,0]$ segundos y $[20, 50]$ cm respectivamente, y se midieron tanto el número de accesos reales omitidos **SV** como el número de falsos positivos. En la Tabla 6 se puede observar que el número de falsos positivos se incrementa cuando t_h es menor a 0,3, y el número de accesos de **SV** omitidos se incrementa cuando t_h es mayor a 0,6. Sin embargo, la secuencia de activación no varía cuando el valor de t_h se encuentra entre 0,3 y 0,6 segundos, excepto cuando el valor h es 20 cm. Con respecto a esto, parece que el valor h no influye en la secuencia de activación excepto cuando su valor es muy bajo. En el puesto de trabajo empleado en el experimento la altura del ítem más alto fue de 20 cm. Cuando h es configurado de 20 cm, su **SV** correspondiente tiene la misma altura que el ítem, evitando que pueda ser apropiadamente detectada la mano. En la Tabla 6 se puede ver que, cuando h es igual a 20 cm siempre hay un acceso **SV** omitido más que cuando h es mayor. En todos estos casos, este acceso **SV** omitido adicional corresponde al ítem más alto del puesto de trabajo.

Considerando las limitaciones del experimento, parece que este método es lo suficientemente robusto cuando los parámetros cambian. El evaluador debe tomar la precaución de establecer el valor h al menos 5 cm mayor que el ítem real. Por otro lado, aunque configurar el valor de t_h requiere algunas pruebas previas, el intervalo de valores que produce resultados buenos es suficientemente grande, y no es crítico establecer algunos valores específicos.

Otra limitación del trabajo está relacionada con el desempeño ergonómico real de las soluciones obtenidas empleando este procedimiento. En el método propuesto la función de aptitud empleada en el AG direcciona la búsqueda del mejor diseño. Así pues, es crucial

considerar los criterios ergonómicos necesarios en la función de aptitud. Si la función de aptitud se define correctamente la probabilidad de obtener un buen desempeño ergonómico en el diseño obtenido es alta, sin embargo, es necesario asegurar esto a través de una evaluación ergonómica real posterior. Con respecto a esto se enfocarán futuras investigaciones en la medición de la calidad ergonómica de las soluciones obtenidas empleando este algoritmo, y en cómo la definición de la función de aptitud del AG y sus coeficientes de ponderación afectan a la ergonomía del puesto de trabajo. Mientras tanto, una persona experta debe validar la solución obtenida antes de ponerla en práctica. En su actual formato, este método es una herramienta buena para apoyar las tareas de los ergónomos, pero las personas expertas deben tomar la decisión final.

Otros trabajos futuros pueden intentar extender la capacidad del sistema a puestos de trabajo con varios planos en diferentes orientaciones. Alcanzar este objetivo implica adaptar el AG para distribuir los ítems en diferentes superficies de trabajo.

4.1.9. Conclusiones

Aunque debe desarrollarse más la tecnología de los sensores RGB-D para que su uso se generalice en entornos reales de trabajo, ya es posible emplearlos en aplicaciones que tengan en cuenta sus limitaciones actuales. En este trabajo se ha empleado un sensor RGB-D como dispositivo de adquisición de datos posturales usados, los cuales fueron posteriormente procesados por un AG para optimizar el diseño de puestos de trabajo. Los resultados obtenidos muestran que esta aplicación permite automatizar y simplificar este proceso. El sistema puede generar diseños adaptados a diferentes procesos de producción en puestos de trabajo donde se fabrican diferentes productos o calcular diseños óptimos para varios trabajadores que ocupan el mismo puesto en diferentes turnos.

Agradecimientos: Este trabajo contó con el apoyo del programa estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los retos de la sociedad del gobierno de España, bajo subvención TIN2013-42504-R.

4.10. Referencias.

- Amaral, A.R.S., 2006. On the exact solution of a facility layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* 173, 508–518. doi:10.1016/j.ejor.2004.12.021
- Asteriadis, S., Chatzitofis, A., Zarpalas, D., Alexiadis, D.S., Daras, P., 2013. Estimating human motion from multiple Kinect sensors, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision / Computer Graphics Collaboration Techniques and Applications - MIRAGE '13*. p. 1. doi:10.1145/2466715.2466727
- Battini, D., Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., 2011. New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. *Int. J. Ind. Ergon.* 41, 30–42. doi:10.1016/j.ergon.2010.12.001
- Berger, K., Meister, S., Nair, R., Kondermann, D., 2013. A State Of the Art Report on Research in Multiple RGB-D sensor Setups, in: Grzegorzec, M., Theobalt, C., Koch, R., Kolb, A. (Eds.), *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 257–272. doi:10.1007/978-3-642-44964-2_12
- Best, R., Begg, R., 2006. Overview of movement analysis and gait features. *Libr. en Google Play Comput. Intell. Mov. Sci. neutral networks other Emerg. Tech.* 1–69. doi:10.4018/978-1-59140-836-9
- Bonnechère, B., Jansen, B., Salvia, P., Bouzahouene, H., Omelina, L., Moiseev, F., Sholukha, V., Cornelis, J., Rooze, M., Jan, S.V.S., 2013a. Validity and reliability of the Kinect within functional assessment activities: Comparison with standard stereophotogrammetry. *Gait Posture*. doi:10.1016/j.gaitpost.2013.09.018
- Bonnechère, B., Sholukha, V., Moiseev, F., Rooze, M., S, V.S.J., 2013b. From Kinect™ to anatomically-correct motion modelling: Preliminary results for human application., in: Schouten, B., Fedtke, S., Bekker, T., Schijven, M., Gekker, A. (Eds.), *Games for Health: Proceedings of the 3rd European Conference on Gaming and Playful Interaction in Health Care*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 15–24. doi:10.1007/978-3-658-02897-8
- Brodie, M.A., Walmsley, A., Page, W., 2008. The static accuracy and calibration of inertial measurement units for 3D orientation. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* 11, 641–8. doi:10.1080/10255840802326736
- Clark, R. a, Pua, Y.-H., Fortin, K., Ritchie, C., Webster, K.E., Denehy, L., Bryant, A.L., 2012. Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control. *Gait Posture* 36, 372–7. doi:10.1016/j.gaitpost.2012.03.033
- Clark, R.A., Bower, K.J., Mentiplay, B.F., Paterson, K., Pua, Y.H., 2013. Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait variables. *J. Biomech.* 46,

2722–2725. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.08.011

- Das, B., Behara, D.N., 1995. Determination of the normal horizontal working area: a new model and method. *Ergonomics* 38, 734–748. doi:10.1080/00140139508925145
- Das, B., Sengupta, A.K., 1996. Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach. *Appl. Ergon.* 27, 157–163. doi:10.1016/0003-6870(96)00008-7
- Deros, B.M., Khamis, N.K., Ismail, A.R., Jamaluddin, H., Adam, A.M., Rosli, S., 2011. An Ergonomics study on assembly line workstation design. *Am. J. Appl. Sci.* 8, 1195–1201. doi:10.3844/ajassp.2011.1195.1201
- Destelle, F., Ahmadi, A., O'Connor, N.E., Moran, K., Chatzitofis, A., Zarpalas, D., Daras, P., 2014. Low-cost accurate skeleton tracking based on fusion of kinect and wearable inertial sensors, in: *European Signal Processing Conference*. pp. 371–375.
- Diego-Mas, J.A., Alcaide-Marzal, J., 2014. Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work. *Appl. Ergon.* 45, 976–85. doi:10.1016/j.apergo.2013.12.001
- Diego-Mas, J.A., Santamarina-Siurana, M.C., Alcaide-Marzal, J., Cloquell-Ballester, V.A., 2009. Solving facility layout problems with strict geometric constraints using a two-phase genetic algorithm. *Int. J. Prod. Res.* 47, 1679–1693. doi:http://dx.doi.org/10.1080/00207540701666253
- Diego-Mas, J.A., Santamarina-Siurana, M.C., Cloquell-Ballester, V.A., Alcaide-Marzal, J., 2008. Slicing tree's geometric potential: an indicator for layout problems based on slicing tree structure. *Int. J. Prod. Res.* 46, 1071–1087. doi:10.1080/00207540600932061
- Drira, A., Pierreval, H., Hajri-Gabouj, S., 2007. Facility layout problems: A survey. *Annu. Rev. Control* 31, 255–267. doi:10.1016/j.arcontrol.2007.04.001
- Dutta, T., 2012. Evaluation of the Kinect™ sensor for 3-D kinematic measurement in the workplace. *Appl. Ergon.* 43, 645–9. doi:10.1016/j.apergo.2011.09.011
- Dyckhoff, H., 1990. A typology of cutting and packing problems. *Eur. J. Oper. Res.* 44, 145–159. doi:10.1016/0377-2217(90)90350-K
- El-Baz, M.A., 2004. A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments. *Comput. Ind. Eng.* 47, 233–246. doi:10.1016/j.cie.2004.07.001
- Fernández-Baena, A., Susín, A., Lligadas, X., 2012. Biomechanical validation of upper-body and lower-body joint movements of kinect motion capture data for rehabilitation

- treatments, in: Proceedings of the 2012 4th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, INCoS 2012. pp. 656–661. doi:10.1109/iNCoS.2012.66
- Garcia, J., Zalevsky, Z., 2007. Range Mapping Using Speckle Decorrelation. Google Patents. US 20070216894 A1.
- Geiselhart, F., Otto, M., Rukzio, E., 2016. On the Use of Multi-Depth-Camera Based Motion Tracking Systems in Production Planning Environments. *Procedia CIRP* 41, 759–764. doi:10.1016/j.procir.2015.12.088
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, Boston, MA.
- Haggag, H., Hossny, M., Nahavandi, S., Creighton, D., 2013. Real time ergonomic assessment for assembly operations using kinect, in: Proceedings - UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim 2013. pp. 495–500. doi:10.1109/UKSim.2013.105
- Han, J., Shao, L., Xu, D., Shotton, J., 2013. Enhanced computer vision with Microsoft Kinect sensor: A review. *IEEE Trans. Cybern.* 43, 1318–1334. doi:10.1109/TCYB.2013.2265378
- Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., Chen, H., 2007. Ant colony optimization for solving an industrial layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* 183, 633–642. doi:10.1016/j.ejor.2006.10.032
- Hasegawa, M., Ikeguchi, T., Aihara, K., Itoh, K., 2002. A novel chaotic search for quadratic assignment problems. *Eur. J. Oper. Res.* 139, 543–556. doi:10.1016/S0377-2217(01)00189-8
- Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X., Fox, D., 2012. RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. *Int. J. Rob. Res.* 31, 647–663. doi:10.1177/0278364911434148
- Islir, A.A., 1998. A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design. *Int. J. Prod. Res.* 36, 1549–1569. doi:10.1080/002075498193165
- Jain, P.K., Sharma, P.K., 2005. Solving Job Shop Layout Problem Using Ant Colony Optimization Technique, in: 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. pp. 288–292. doi:10.1109/ICSMC.2005.1571160
- James, T., Rego, C., Glover, F., 2009. Multistart tabu search and diversification strategies for the quadratic assignment problem. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans* 39, 579–596. doi:10.1109/TSMCA.2009.2014556

- Khoshelham, K., Elberink, S., 2012. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* 12, 1437–1454. doi:10.3390/s120201437
- Kusiak, A., Heragu, S.S., 1987. The facility layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* doi:10.1016/0377-2217(87)90238-4
- Mahoney, J.M., Kurczewski, N.A., Froede, E.W., 2015. Design method for multi-user workstations utilizing anthropometry and preference data. *Appl. Ergon.* 46, 60–66. doi:10.1016/j.apergo.2014.07.003
- Merz, P., Freisleben, B., 1999. A comparison of memetic algorithms, tabu search, and ant colonies for the quadratic assignment problem. *Proc. 1999 Congr. Evol. Comput. Cat No 99TH8406 3*, 2063–2070. doi:10.1109/CEC.1999.785529
- Nixon, M.E., Howard, A.M., Chen, Y.P., 2013. Quantitative evaluation of the Microsoft Kinect™ for use in an upper extremity virtual rehabilitation environment, in: 2013 International Conference on Virtual Rehabilitation, ICVR 2013. pp. 222–228. doi:10.1109/ICVR.2013.6662131
- NUI, 2013. Natural User Interface for Kinect for Windows [WWW Document]. Microsoft Dev. Netw. URL <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh855352.aspx>
- Obdržálek, S., Kurillo, G., Ofli, F., Bajcsy, R., Seto, E., Jimison, H., Pavel, M., 2012. Accuracy and robustness of Kinect pose estimation in the context of coaching of elderly population. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2012*, 1188–93. doi:10.1109/EMBC.2012.6346149
- Occupational Outlook Handbook [WWW Document], 2015. . Bur. Labor Stat. U.S. Dep. Labor. URL <http://www.bls.gov/ooh/production/assemblers-and-fabricators.htm> (accessed 5.30.16).
- Önüt, S., Tuzkaya, U.R., Doğaç, B., 2008. A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem. *Comput. Ind. Eng.* 54, 783–799. doi:10.1016/j.cie.2007.10.012
- Patrizi, A., Pennestrì, E., Valentini, P.P., 2015. Comparison between low-cost marker-less and high-end marker-based motion capture systems for the computer-aided assessment of working ergonomics. *Ergonomics* 1–11. doi:10.1080/00140139.2015.1057238
- Pfister, A., West, A.M., Bronner, S., Noah, J.A., 2014. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis. *J. Med. Eng. Technol.* 38, 274–80. doi:10.3109/03091902.2014.909540
- Plantard, P., Auvinet, E., Pierres, A.-S. Le, Multon, F., 2015. Pose estimation with a Kinect for ergonomic studies: evaluation of the accuracy using a virtual mannequin. *Sensors*

(Basel). 15, 1785–803. doi:10.3390/s150101785

- Saifullah Hussin, M., Stützle, T., 2014. Tabu search vs. simulated annealing as a function of the size of quadratic assignment problem instances. *Comput. Oper. Res.* 43, 286–291. doi:10.1016/j.cor.2013.10.007
- Sanders, M.S., McCormick, E.J., 1993. *Human factors in engineering and design*, New York: McGraw-Hill .
- Santos, J., Sarriegi, J.M., Serrano, N., Torres, J.M., 2007. Using ergonomic software in non-repetitive manufacturing processes: A case study. *Int. J. Ind. Ergon.* 37, 267–275. doi:10.1016/j.ergon.2006.10.022
- Saptari, A., Lai, W.S., Salleh, M.R., 2011. Jig design, assembly line design and work station design and their effect to productivity. *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* 5, 9–16.
- Sarbolandi, H., Lefloch, D., Kolb, A., 2015. Kinect range sensing: Structured-light versus Time-of-Flight Kinect. *Comput. Vis. Image Underst.* 139, 1–20. doi:10.1016/j.cviu.2015.05.006
- Shikdar, A.A., Al-Hadhrami, M., 2007. Smart workstation design: An ergonomics and methods engineering approach. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 2, 363–374. doi:10.1504/IJISE.2007.013184
- Shikdar, A.A., Al-Hadhrami, M., 2012. Evaluation of a low-cost ergonomically designed adjustable assembly workstation. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 10, 153–166. doi:10.1504/IJISE.2012.045178
- Shikdar, A.A., Al-Kindi, M.A., 2007. Office ergonomics: deficiencies in computer workstation design. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 13, 215–223. doi:10.1080/10803548.2007.11076722
- Shinde, G. V., Jadhav, V.S., 2012. “Ergonomic analysis of an assembly workstation to identify time consuming and fatigue causing factors using application of motion study.” *Int. J. Eng. Technol.* 4, 220–227.
- Spector, J.T., Lieblich, M., Bao, S., McQuade, K., Hughes, M., 2014. Automation of workplace lifting hazard assessment for musculoskeletal injury prevention. *Ann. Occup. Environ. Med.* 26, 15. doi:10.1186/2052-4374-26-15
- Srinivas, M., Patnaik, L.M., 1994. Genetic algorithms: a survey. *Computer (Long Beach Calif)*. 27. doi:10.1109/2.294849
- Tam, K.Y., 1992. Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design. *Eur. J. Oper. Res.* 63, 322–346. doi:10.1016/0377-2217(92)90034-7
- Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Tanchoco, J.M.A., 2010. *Facilities Planning*, 4th ed.

- Trask, C., Mathiassen, S., 2012. Data collection costs in industrial environments for three occupational posture exposure assessment methods. *BMC Med. Res. Methodol.* 12, 89.
- Xu, X., McGorry, R.W., 2015. The validity of the first and second generation Microsoft Kinect for identifying joint center locations during static postures. *Appl. Ergon.* 49, 47–54. doi:10.1016/j.apergo.2015.01.005
- Yang, L., Zhang, L., Dong, H., Alelaiwi, A., Saddik, A., 2015. Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for Windows v2. *IEEE Sens. J.* 15, 4275–4285. doi:10.1109/JSEN.2015.2416651
- Zha, X.F., 2003. Soft computing framework for intelligent human-machine system design, simulation and optimization. *Soft Comput. - A Fusion Found. Methodol. Appl.* 7, 184–198. doi:10.1007/s00500-002-0196-4
- Zha, X.F., Lim, S.Y.E., 2003. Intelligent design and planning of manual assembly workstations: A neuro-fuzzy approach. *Comput. Ind. Eng.* 44, 611–632. doi:10.1016/S0360-8352(02)00238-3
- Zhang, L., Sturm, J., Cremers, D., Lee, D., 2012. Real-time human motion tracking using multiple depth cameras, in: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on.* IEEE, pp. 2389–2395. doi:10.1109/IROS.2012.6385968

CAPÍTULO V. - ARTICULO III

5.1. Optimización del diseño de las interfaces de usuario mediante el rastreo ocular, movimientos del ratón y algoritmos genéticos.

Se presenta a continuación el tercer artículo que forma parte del compendio de artículos de esta TD, junto con la referencia completa adaptada al formato de la tesis. El artículo fue publicado en la revista *Applied Ergonomics*, volumen 78, páginas 197-209, el 13 de marzo de 2019. En el año de la publicación, la revista estaba clasificada dentro del primer cuartil de su categoría, con factor de impacto de 1.071.

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.03.004>

5.1.1. Resumen

Establecer el mejor diseño para las interfaces generadas por el ordenador y los paneles de control es un problema complejo cuando se incluyen varios controles e indicadores. Se han desarrollado varios métodos para organizar los elementos de la interfaz; sin embargo, los resultados son generalmente diseños conceptuales que deben ser ajustados manualmente para obtener un diseño válido en entornos reales. Basados en estas consideraciones, en este trabajo se propone un nuevo método automatizado para obtener diseños óptimos para interfaces basados en un software. Se emplea la información de rastreo ocular y movimiento del ratón recogida durante el uso de la interfaz para obtener la mejor configuración de sus elementos. Las soluciones son generadas empleando un Algoritmo Genético basado en árbol de cortes. Este algoritmo es capaz de obtener configuraciones realmente aplicables que respeten las restricciones geométricas de los elementos en la interfaz. Los resultados muestran que este método aumenta la efectividad, la eficiencia y la satisfacción de los usuarios cuando ellos interactúan con las interfaces obtenidas.

Palabras clave: interfaces, diseño, Eye-Tracking (rastreo ocular), Algoritmos Genéticos.

5.1.2. Introducción

Las interfaces hombre-máquina pueden ser tan simples como pantallas o controles sencillos, o tecnológicamente tan avanzadas como un Panel de Control (PC) con capacidad multi-táctil. A través de los años, las máquinas y los procesos que son controlados con PCs se han vuelto cada vez más complejos. Se han logrado progresos significativos en el rastreo de procesos e instrumentación de controles. En consecuencia, el número de indicadores y controles en PCs está aumentando constantemente. Actualmente, las interfaces clásicas y los PCs han sido reemplazados por Pantallas de Visualización de Datos (PVDs) en salas de control de procesos industriales, por ejemplo en plantas de energía o minas (Carvalho et al., 2008; Horberry et al., 2010; Hwang et al., 2009; Lin and Wu, 2010), o en transportes públicos tales como trenes, barcos o aviones (Degani et al., 1992). Así mismo las PVDs se

encuentran presentes en procesos que requieren que una gran cantidad de datos sean presentados simultáneamente, como sucede en el mercado bursátil de valores, el cuidado de la salud, el tráfico, etc. (Raeisi et al., 2016). Progresivamente, han sido reemplazados los controles "hard" (duros) y pantallas por elementos "soft" (blandos) reconfigurables en PVDs (Degani et al., 1992).

En el pasado han sido plenamente estudiados el diseño de los PCs, y los diferentes tipos de controles y pantallas que los conforman, empleando principios del procesado de información humana (Alluisi and Morgan, 1976) buscando obtener eficiencia, seguridad y ergonomía (Kantowitz and Sorkin, 1983; Kroemer et al., 2001; Sanders and McCormick, 1993). Se han establecido reglas bien conocidas para seleccionar y organizar diferentes tipos de controles y pantallas en interfaces, acordes con diferentes tipos de necesidades y condiciones (International Organization for Standardization, 2008; Kroemer et al., 2001; Stewart, 1995). Por ejemplo, ISO 11064-5 contiene una lista de verificación para comprobar la implementación de los principios de diseño, así como también una descripción del proceso para las especificaciones de las pantallas y los controles.

A diferencia de los antiguos PCs analógicos, las interfaces generadas por un software ofrecen más flexibilidad y adaptabilidad. Pueden ser adaptados la configuración y el diseño del PC a los requerimientos de los usuarios y a las tareas que desarrollan. Por ejemplo, en un PC basado en Software, los controles y las pantallas generalmente se presentan en pantallas que pueden ser redimensionadas o reorganizadas. Por lo tanto, empleando interfaces generadas por un software pueden alcanzarse altos niveles de eficiencia, al mismo tiempo que se satisfacen los requerimientos personales (Nachreiner et al., 2006).

En la medida en que las interfaces se vuelven más complejas y flexibles, aparecen nuevas oportunidades y problemas. Gracias a la adaptabilidad de las interfaces generadas por softwares, es posible adaptar el diseño de los PCs a los requerimientos de la tarea desempeñada (Gajos et al., 2006a), o al usuario del PC en cada momento (Todi et al., 2018). Sin embargo, establecer la mejor configuración para un PC que incluye varios controles e indicadores es un problema complejo. Deben ser establecidos la posición y tamaño adecuados de cada elemento para optimizar el desarrollo de la tarea, basado en distintos criterios, mientras se consideran múltiples restricciones para mantener la usabilidad del PC. Afortunadamente los nuevos métodos de interacción computacional ayudan a resolver estos problemas. Una revisión de los mismos puede encontrarse en Oulasvirta et al. (2018).

Se han desarrollado varios métodos para organizar los elementos de la interfaz en los PCs (Chapanis, 1996; Oulasvirta et al., 2017a). Las técnicas de análisis de proceso desarrollan un análisis funcional de la interacción estudiando diferentes pasos del proceso. Basados en

este análisis, se crean diagramas de flujos y gráficos de interacción y pueden ser empleados para establecer el diseño de la interfaz en un PC (Alppay and Bayazit, 2015). El análisis de relaciones (Lin and Wu, 2010; Wickens et al., 2003) es una técnica de análisis de procesos ampliamente utilizada para mejorar las interfaces de los usuarios. Esta técnica analiza las relaciones entre los elementos de los PCs e indica la intensidad de estas relaciones empleando valores estadísticos en los enlaces entre los elementos correspondientes.

Generalmente, los resultados de la aplicación de estos modelos son diagramas esquemáticos, tablas de interacción o diagramas de secuencia que pueden ser utilizados para optimizar la organización de los elementos en la interfaz. Inicialmente, expertos creaban manualmente el diseño de los PCs apoyándose en su experiencia y en los principios de diseño; sin embargo, cuando la complejidad del problema aumentó, se desarrollaron programas informáticos y modelos computacionales para apoyar a los diseñadores (Foley et al., 1991; Kim and Foley, 1990; Oulasvirta et al., 2018; Wu and Liu, 2009). El enfoque más común consiste en construir un modelo cuantitativo de la interacción entre el usuario y la interfaz, y así, buscar la configuración que proporcione el mejor rendimiento del modelo (Francis, 2000). Debido a la complejidad del problema, se han utilizado técnicas tales como la Programación Lineal (Holman et al., 2003), el Algoritmo de Algoritmo de Escalada Simple (Francis, 2000), el Algoritmo de Recorrido Simulado (Francis, 2000; Geman and Geman, 1984) y diferentes heurísticas y metaheurísticas.

Estos métodos presentan dos problemas principales. En primer lugar, los resultados son diseños conceptuales que deben ser manualmente ajustados para obtener un diseño válido en un entorno real. Aunque, estas configuraciones generales indican la posición óptima para cada componente, hay restricciones tales como el tamaño o la forma de los controles y las pantallas, o el espacio disponible total en el PC, las cuales no son consideradas en la solución que proporcionan estos métodos. Por lo tanto, es necesario introducir cambios en la configuración inicial y, en consecuencia, la solución finalmente implementada puede estar muy lejos de la óptima. Por otro lado, algunos de los métodos empleados para recoger datos pueden afectar el comportamiento del operario observado, pueden presentar subjetividad en la medida o pueden ser imprecisos (Alppay and Bayazit, 2015). Estos problemas dificultan la obtención de resultados significativos o generalizar las conclusiones.

Evitar estos inconvenientes implica utilizar una técnica de resolución que considere las restricciones geométricas de los PCs durante la búsqueda de un diseño óptimo. De esta forma, puede ser directamente implementada la solución obtenida sin la necesidad de realizar ajustes manuales que distorsionen el diseño. Por otro lado, es necesario utilizar un

método de recogida de datos más simple, rápido y menos invasivo durante la observación de las actividades de los operarios. Alcanzar estos objetivos puede simplificar el proceso de obtención de nuevos diseños óptimos y tomar ventaja de la adaptabilidad de los PCs basados en software.

Basado en estas consideraciones, en este trabajo se propone un nuevo método automatizado para obtener diseños óptimos para PCs basados en un software. Se recogen los datos de los dispositivos de entrada (por ejemplo, la ruta del cursor sobre la pantalla y los clicks de los botones del ratón) durante la ejecución de tareas habituales por parte del operario en el PC. Simultáneamente, los dispositivos de rastreo ocular se emplean para recoger datos de la mirada de los operarios sobre el PC. Por otro lado, se construye un modelo cuantitativo de la interacción que ocurre entre el usuario y la interfaz empleando principios comunes en la organización de los elementos en los PCs (Sanders and McCormick, 1993). Basados en estos principios y empleando los datos recogidos, se establecen relaciones entre los elementos de la interfaz las cuales son las relaciones en tablas relacionales (Wickens et al., 2003). Finalmente se utiliza un AG basado en árbol de cortes (Holland, 1975; Srinivas and Patnaik, 1994) para optimizar la configuración de las pantallas y los controles en los PCs. Esta metaheurística, basada en la estructura de árbol de cortes (Tam, 1992), es especialmente eficiente en la búsqueda de soluciones geoméricamente aceptables (Diego-Mas et al., 2017), evitando la necesidad de ajustes manuales en el diseño final.

El rastreo ocular es una técnica particularmente relevante para evaluar las interacciones usuario-máquina y la carga mental durante la ejecución de las tareas, que ha sido previamente empleada para analizar interacciones entre usuarios y PCs (Karn et al., 1999; Martin et al., 2011; Stainer et al., 2013; Starke et al., 2015; Wedel., 2017). Principalmente, los trabajos anteriores hablan de la evaluación de la carga mental al ejecutar las tareas. Algunos de ellos usan el rastreo ocular para comparar los flujos de trabajo de los usuarios o para evaluar la correspondencia entre el movimiento ocular y el objetivo de una tarea. Así pues, se emplea la mirada para evaluar las condiciones laborales o el nivel de adaptación de un PC a la tarea que se desempeña. Sin embargo, los datos no se emplean obtenidos para mejorar el diseño de los PCs. Una de las contribuciones principales de este trabajo consiste en la integración de la información del rastreo ocular en el diseño de la configuración óptima de los PCs.

Las secciones siguientes describen el método desarrollado y su aplicación a un caso de estudio. La sección 5.1.3. describe los principios de diseño y los datos recogidos para generar los diseños de los PCs, así como también la técnica empleada para medir el

desempeño de las interacciones de los operarios con los PCs. La sección 5.1.4. muestra la definición del problema y el AG diseñado para encontrar el diseño que mejor se ajuste a los criterios establecidos con respecto a las restricciones geométricas. Se presenta el caso de estudio en la sección 5.1.5. y los resultados en la 5.1.6. Finalmente, se discuten los resultados en la sección 5.1.8.

5.1.3. Principios de diseño, recogida de datos y medición del rendimiento

En el diseño de interfaces han sido ampliamente aceptados y empleados los principios básicos de diseño para la organización de los elementos de una interfaz establecida en Sanders and McCormick (1993). El principio de secuencia de uso especifica que los elementos de una interfaz empleados en las secuencias operacionales deben ubicarse con respecto a éstas. De la misma forma, el principio de compatibilidad de la proximidad (Wickens and Carswell, 1995) exige que se deben colocar los elementos que son relevantes a una tarea común o a una operación mental unos cerca de otros. También debe considerarse la frecuencia de uso de cada elemento presente en un PC. Así pues, deben ubicarse los controles e indicadores que se usan frecuentemente en posiciones adecuadas. Deben definirse la posición y área ocupada por estos elementos para facilitar la accesibilidad y usabilidad.

Se deben transformar estos principios de diseño en requerimientos de diseño. Generalmente se establecen los siguientes requerimientos de diseño:

- ✓ Los elementos del PC que son empleados frecuentemente de forma secuencial, deben estar cercanos entre sí en la configuración.
- ✓ Los elementos del PC que son empleados en conjunto en tareas comunes deben guardar cercanía entre sí.
- ✓ Los elementos deben ser dimensionados de acuerdo a su frecuencia de acceso y uso.

La implementación de estos requerimientos de diseño hace necesario establecer un acceso al elemento del PC. Un usuario del PC basado en software puede acceder a un elemento de dos formas: obteniendo información de un indicador o una pantalla, o empleando un control (por ejemplo, pulsando sobre él con el ratón). De manera habitual, los usuarios de PC usan un control mientras observan una pantalla para leer la respuesta del proceso controlado. Pongamos por caso un PC en el que se accede secuencialmente a dos elementos; se accede al control por medio de un puntero y a la vez se accede a la pantalla usando la mirada. Por esta razón, serán consideradas tanto el uso del puntero como la

mirada al elemento como un acceso en este trabajo. De esta forma, mirar consecutivamente hacia dos elementos, o utilizar un control mientras se mira otro elemento, serán considerados casos de acceso secuencial entre dos elementos.

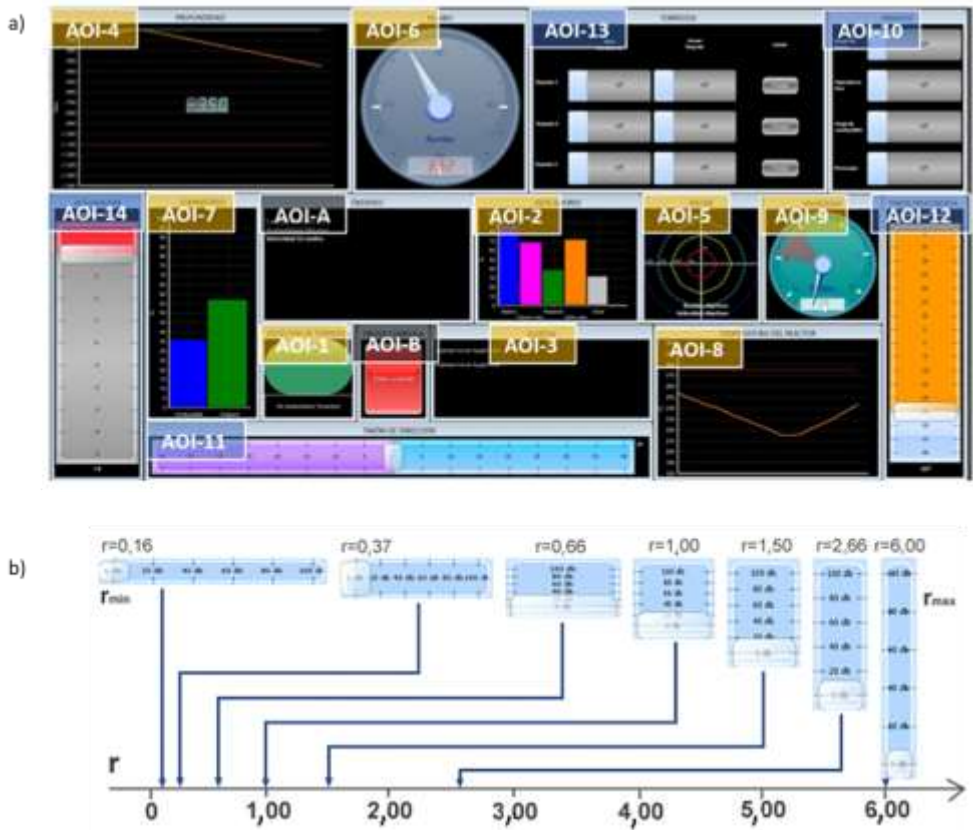


Figura 6. (a) Áreas de interés (AOI) definidas para cada elemento de la interfaz. De la AOI-1 a la AOI-9 son áreas construidas a partir de indicadores, y de la AOI-10 a la AOI-14 a partir de controles. AOI-A y AOI-B se definieron sobre elementos relacionados a los sistemas de comunicación. (b) Variación de la forma de un elemento del PC entre las ratios geométricas mínima y máxima. Las ratios menores a 1 conducen a orientaciones horizontales. Las ratios mayores a 1 conducen a orientaciones verticales.

Durante la operación del PC, deben ser registrados el número y la secuencia de accesos a sus elementos. Pueden registrarse los acontecimientos del software del puntero para detectar las acciones de los controles. Al mismo tiempo, un dispositivo de rastreo ocular recoge datos sobre la mirada de los usuarios. Una vez los datos han sido obtenidos, serán empleados para optimizar la configuración de los elementos del PC siguiendo los requerimientos de diseño que han sido previamente mencionados. Este proceso de

optimización requiere la definición de una función de aptitud cuantitativa que mida hasta qué punto una configuración propuesta cumple los requerimientos del diseño. El objetivo del proceso de optimización es encontrar el diseño que maximice dicha función de aptitud.

La calidad de la configuración de los elementos en un PC depende del rendimiento de la interacción usuario-PC. Una vez que se ha obtenido la configuración que mejor se ajusta a los requerimientos de diseño, se debe comparar su rendimiento con otras configuraciones para validar la aptitud del método presentado en este trabajo para encontrar diseños óptimos. El rendimiento de la interacción usuario-interfaz debería considerar eficacia, eficiencia, y la satisfacción en el desarrollo de las tareas (International Organization for Standardization, 1998), y deben emplearse diferentes indicadores para medir cada uno de estos aspectos (Frokjær et al., 2000). En el caso de estudio de este trabajo se medirá el rendimiento del diseño propuesto mientras un grupo de usuarios lleva a cabo la misma serie de tareas. De esta forma, se podrá comparar el número de errores cometidos, el tiempo empleado en cometerlos y la satisfacción de los usuarios medida de acuerdo a escalas de calificación de aptitud.

5.1.4. Material y métodos

El método propuesto en este trabajo tiene dos etapas. En la primera etapa, son rastreados los usuarios mientras emplean el PC para desarrollar varias tareas predefinidas con el objetivo de recopilar la información sobre el ratón y el movimiento del ojo. Usando estos datos, y en función de los requerimientos de diseño expuestos en la sección anterior, se establecen las relaciones entre los elementos del PC y se presentan en una tabla relacional (Wickens et al., 2003). El valor de la relación entre dos componentes representa la necesidad de cercanía entre ellos. En la segunda etapa, se emplea un AG para obtener el diseño óptimo, considerando la tabla relacional y las restricciones geométricas impuestas a los elementos del diseño.

5.1.4.1. Definición del Problema

La Figura 6a muestra el caso de un PC a optimizar, donde R corresponde a su ratio geométrica (altura/anchura). Generalmente, R coincide con la ratio geométrica de la pantalla que mostrará el PC. Se denomina n al número de elementos que deben ser distribuidos en el PC, siendo a_i el porcentaje del área del PC ocupada por cada elemento i . Estas áreas son consideradas rectangulares y de geometría flexible. Geometría flexible significa que la ratio geométrica del área asignada para un elemento puede variar dentro de ciertos límites (restricciones geométricas). Estos límites (r_{\min_i} y r_{\max_i}) dependen del tipo de control o indicador que ocupa el área, y deben establecerse teniendo en cuenta la usabilidad del elemento. Por ejemplo, supongamos que a es el área ocupada por una barra

deslizante en un PC, siendo las ratios mínima y máxima permisibles para dicho elemento $r_{\min} = 0,16$ y $r_{\max} = 6,00$ respectivamente. La Figura 6b muestra las diferentes formas que puede adoptar la barra deslizante. Mientras el área a se mantiene constante, la ratio entre la altura y la anchura de la barra deslizante varía entre de r_{\min} y r_{\max} . Deben ser asignados tanto el área como los límites geométricos de los elementos considerando que ciertos controles e indicadores requieren una orientación específica. Por ejemplo, los elementos con ambas ratios con un valor por debajo de uno tienen orientación horizontal (Figura 6b), mientras que las ratios mayores a uno fuerzan orientaciones verticales.

Reorganizar los elementos del PC puede implicar variaciones en el tamaño de los elementos para evitar elementos traslapados o espacios vacíos en la pantalla. Sin embargo, se debe limitar esta variación del área inicial para evitar que algunos elementos que se vuelvan demasiado pequeños, o que elementos frecuentemente utilizados ocupen la mayoría del PC. Así pues, se han definidos las áreas mínimas y máximas de los elementos (a_{\min_i} y a_{\max_i}). De esta manera, el área (a_i) de un elemento puede variar entre $[a_{\min_i}, a_{\max_i}]$.

Resumiendo, la definición del problema, deben ser reorganizados n elementos en un PC con una ratio geométrica R . El área inicial de cada elemento i es a_i , su ratio geométrica puede variar entre r_{\min_i} y r_{\max_i} y su área debe estar en el rango $a_i \pm a_{\lim_i}$.

5.1.4.2. Recogida de Datos

En la primera etapa, se emplea un software ejecutado en un ordenador para simular el PC objetivo en una PVD (Pantalla de Visualización de Datos) equipada con un dispositivo de rastreo ocular que utiliza una pantalla discreta. La posición, tamaño y usabilidad de los elementos son los mismos que los de los elementos del PC objetivo. El software detecta las acciones sobre los controles y un modelo de software del proceso controlado calcula y muestra las respuestas en los correspondientes indicadores del PC.

Para el análisis del rastreo ocular, cada elemento del PC se define como un área de interés (**AOI**) (Holmqvist et al., 2011). Se emplean las **AOI** en los estudios de rastreo ocular para relacionar la medida de los movimientos del ojo con partes de los estímulos empleados (Hessels et al., 2016). Se definen las **AOIs** trazando cuadros alrededor de los elementos de la pantalla (Figura 6a) y se nombran empleando el software de rastreo ocular, empleándose como ayuda para realizar análisis cuantitativos, calculando el tiempo y la frecuencia con que estos elementos fueron observados (Pernice et al., 2009).

Se seleccionaron algunos usuarios con experiencia en el manejo del PC objetivo y se les solicitó completar la misma secuencia de tareas en el PC. La tarea a ser desempeñada

depende del objetivo del estudio y de las características del proceso controlado. La secuencia de tareas puede incluir, por ejemplo, las tareas más frecuentes del proceso controlado, tareas críticas en las cuales no se debe cometer errores o tareas que deben ser realizadas en un tiempo corto. Mientras el operario realiza el trabajo, el software registra el tiempo empleado en ejecutar cada tarea, el número de errores cometidos, los movimientos del ratón en la pantalla y los eventos de click del ratón (incluyendo el número de clicks y la posición del cursor durante cada click). Simultáneamente, el rastreador ocular registra la posición de la mirada del usuario.

Cuando todos los usuarios han realizado la secuencia de tareas, es analizada la información del rastreo ocular de cada usuario para obtener el porcentaje de tiempo de permanencia (PDT) (Blascheck et al., 2014) para cada **AOI**. PDT es el porcentaje de tiempo que los ojos de los usuarios se mantienen en el **AOI** respecto al resto de **AOIs** (Helleberg and Wickens, 2003; Wickens et al., 2002; Wickens C. D., 2008). Por otro lado, son examinados los eventos de click del ratón registrando cuántas veces se hace click sobre cada **AOI** y calculando el porcentaje de clicks sobre cada **AOI** respecto al número total de clicks. Se utilizan estos datos para obtener las transiciones de mirada entre las **AOIs** del PC. Una transición es un movimiento de mirada desde una **AOI** a otra (Goldberg and Kotval, 1999). Una técnica común de visualización de transiciones entre **AOIs** es la serie de transición (Blascheck et al., 2014; Goldberg and Kotval, 1999). La serie de transición organiza las **AOIs** horizontalmente en filas y verticalmente en columnas. Cada elemento de la serie T_{ij} tiene el valor de la cantidad de veces que se han realizado transiciones desde **AOI_i** hacia **AOI_j** (serie de transición unidireccional) o el número de veces que se han realizado transiciones entre **AOI_i** y **AOI_j** independientemente de la dirección de la transición (serie de transición bidireccional) (Harris et al., 1986).

Como se ha mencionado en la sección 5.1.3., se han considerado dos tipos de accesos secuenciales entre los elementos de un PC. El primer tipo se refiere a la transición de la mirada entre dos elementos (accesos secuenciales mirada – mirada). El usuario mira un elemento y después mira otro. El segundo tipo ocurre cuando el usuario de un PC interactúa con un elemento empleando el ratón, mientras que mira otro elemento de forma simultánea (acceso secuencia mirada- ratón). Para capturar este tipo de acceso secuencial se examinan los eventos click del ratón registrando los casos en los que se haga el click sobre una **AOI** mientras que el usuario dirige su mirada a otra. Se usan los datos de todos los usuarios para crear una serie de transición bidireccional, en la que cada elemento tiene el valor $X_{ij} = T_{ij} + C_{ij}$. En esta expresión, T_{ij} es el promedio del número de veces que la transición entre **AOI_i** y **AOI_j** ocurrió y C_{ij} es el promedio de número de clicks sobre uno de estas **AOIs** mientras que el usuario está mirando hacia otra. La diagonal de esta serie

siempre está vacía porque las transiciones entre las mismas **AOIs** no pueden ocurrir. Tomando en cuenta que la serie es simétrica, únicamente se representan los valores debajo de la diagonal principal. Será empleada esta serie de transición como la tabla relacional que indica la necesidad de cercanía entre los elementos del PC.

5.1.4.3. Un algoritmo genético para optimizar el diseño de un PC

Obtener la mejor disposición de un grupo de elementos (controles e indicadores) en una PVD de proporciones conocidas es un problema de asignación cuadrática (Karrenbaer and Oulasvirta, 2014) o un problema de diseño en planta (FLP - Facility Layout Problem) (Kusiak and Heragu, 1987). El FLP es un problema de optimización combinatoria que estudia la configuración de un grupo de componentes con áreas conocidas y desiguales en una superficie plana de dimensiones conocidas. Los elementos a ser organizados interactúan entre ellos; por lo tanto, su configuración debe ser tal que los costes relativos a estas interacciones se mantengan al mínimo.

No hay métodos precisos para resolver FLPs si el número de elementos a ser distribuido es alto. Por lo tanto, se emplean las técnicas metaheurísticas para obtener la solución al problema (Zhu et al., 2017). Las metaheurísticas comúnmente empleadas para resolver FLPs son algoritmos meméticos (Merz and Freisleben, 1999), optimización de las multitudes de partículas (Hosseini-Nasab and Emami, 2013; Önüt et al., 2008), búsqueda tabú (James et al., 2009; McKendall and Liu, 2012), recocido simulado (Kulturel-Konak and Konak, 2015; Saifullah Hussin and Stützle, 2014) o AGs (Diego-Mas et al., 2009; El-Baz, 2004; Küçükoğlu and Öztürk, 2017).

Son ampliamente empleados los AGs en la optimización de interfaces de usuario para el rendimiento humano (Oulasvirta, 2017a, 2017b). Dentro de esta clase de algoritmos, aquellos basados en árbol de cortes (Holland, 1975; Srinivas and Patnaik, 1994) son especialmente eficientes para obtener soluciones geoméricamente aceptables a FLPs con estrictas restricciones geométricas (Diego-Mas et al., 2008), evitando la necesidad de ajustes manuales en el diseño final. Los AG exploran el espacio de soluciones del problema desarrollando una búsqueda guiada estocástica basada en la evolución de un grupo (población) de estructuras (cromosomas) (Goldberg, 1989). Cada cromosoma representa una solución al problema. Se evalúa la población de cromosomas empleando una función de aptitud para medir su idoneidad en cuanto a los requerimientos del problema. Basado en la aptitud de cada cromosoma, se obtiene una nueva población que hereda las mejores características de sus predecesores. La nueva población es el resultado de varias transformaciones guiadas por algunos usuarios genéticos (normalmente selección, cruce y mutación), los cuales combinan o alteran los cromosomas obteniendo nuevas soluciones.

Se repite este método iterativo durante un número predefinido de iteraciones, o hasta alcanzar otro criterio de parada.

Deben poderse aplicar los diseños obtenidos empleando estos métodos en entornos reales. Por lo tanto, deben respetarse las restricciones geométricas de los elementos que los conforman. Deben ser consideradas inaceptables aquellas soluciones que no cumplan con estos límites. Por esta razón, se propone utilizar un AG basado en árbol de cortes para obtener los diseños de los PCs. Este AG utiliza árbol de cortes para generar las soluciones. En este caso, el árbol de cortes es de raíz binaria, en el cual a cada hoja se le asigna un entero integrador único que corresponde al identificador de un elemento a distribuir en el PC. Cada nodo interno representa la forma (vertical u horizontal) en la que es cortada una partición rectangular de la PVD es cortada, asignando los elementos en cada rama del nodo en cada lado de la partición. La Figura 7 muestra dos árboles de cortes empleados para organizar 5 elementos en una PVD recortando su espacio de manera iterativa. Cada hoja de los árboles corresponde a un elemento del PC. Cada nodo interno representa la manera en la que es cortada una partición rectangular de la PVD (V vertical, H horizontal), organizando los elementos en cada rama del nodo en cada lado de la partición. Se generan las particiones descendiendo de forma iterativa a lo largo del árbol. Si se corta horizontalmente la partición, son ubicados los elementos en el sub-árbol izquierdo y en el sub-árbol derecho en el lado superior e inferior de la partición respectivamente. Si se corta verticalmente la partición, son ubicados los elementos del PC en el sub-árbol izquierdo y sub-árbol derecho en el lado izquierdo y derecho de la partición respectivamente. Se obtiene el cálculo del punto de corte de forma directa, ya que son conocidas las áreas de los elementos a ser asignados en cada partición. Se pueden generar diferentes distribuciones modificando el tipo de corte que se hace en los nodos internos, o también modificando la estructura del árbol.

El AG propuesto opera en dos fases. En la primera el algoritmo busca un árbol de cortes óptimo. Los árboles son generados aplicando técnicas de agrupación (empleando el método de relación promedio) considerando los requisitos de los diferentes elementos para estar cerca el uno del otro, y el potencial geométrico del árbol de cortes (Diego-Mas et al., 2008). El potencial geométrico es un indicador de la capacidad de un árbol de cortes para generar soluciones geoméricamente aceptables. En la segunda fase, empleando el árbol de cortes previamente obtenido, el algoritmo busca el diseño óptimo cambiando el tipo de corte realizado en los nodos del árbol óptimo. Puede encontrarse una descripción detallada del funcionamiento en este tipo de algoritmos en Diego-Mas et al., 2008.

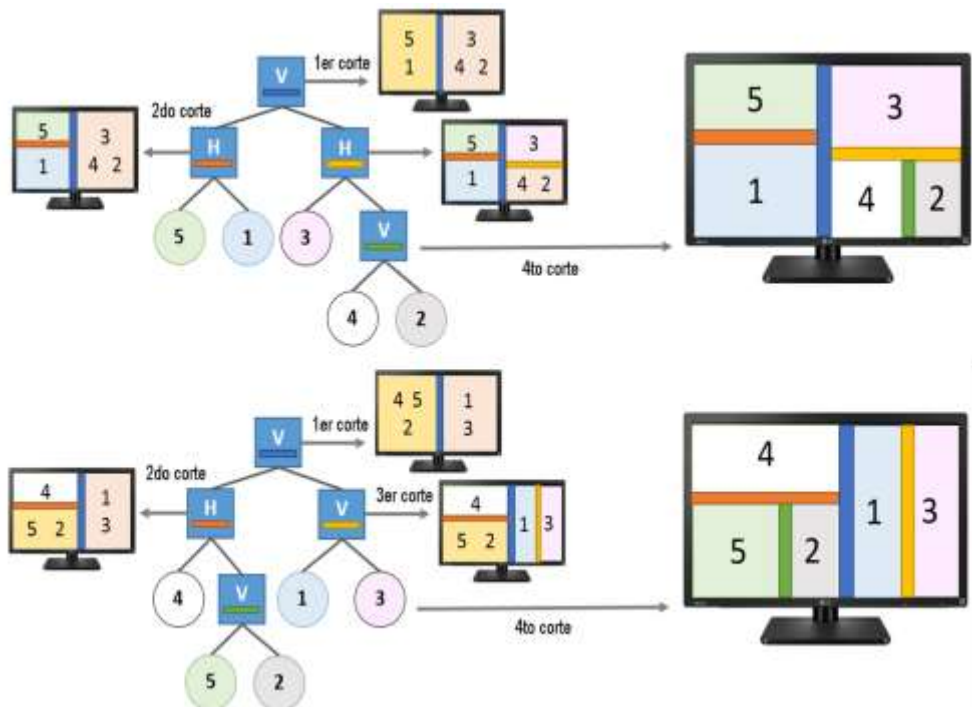


Figura 7. Generación de diseños de PC en una PVD a partir de árbol de cortes. Cada hoja de los árboles corresponde a un elemento del PC. Cada nodo interno representa la forma en la que se corta una partición rectangular de la PVD (V vertical, H horizontal), distribuyendo los elementos en cada rama del nodo en cada lado de la partición. Las modificaciones del tipo de corte realizadas en los nodos internos, o en la estructura del árbol, generarán diferentes diseños.

5.1.4.3.1. Función de Aptitud

En un FLP, deben ser organizados los elementos de tal forma que se minimicen los costes relativos a las interacciones entre ellos, y se respeten las restricciones geométricas. Este coste es la función de aptitud que el AG debe minimizar. Se define el coste (C) de un diseño, para los elementos de un PC, como se muestra en la Ecuación 4. En esta ecuación, n es el número de elementos que serán distribuidos en el PC. El Coste Total está compuesto por dos términos: el Coste Relacional y el Coste Geométrico. El Coste Relacional (el primer término en el segundo miembro de la ecuación) es el coste debido a la intensidad de la relación entre cada par de elementos y la distancia entre ellos en el diseño. El Coste Geométrico (segundo término en el segundo miembro) mide el grado en que las restricciones geométricas de los elementos son respetadas en el diseño evaluado.

Ecuación 4.

$$C = Rc \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} + Gc \sum_{i=1}^n g_i$$

Para optimizar el diseño de un PC, los elementos que frecuentemente se utilicen de forma secuencial deben estar cercanos el uno del otro dentro de la configuración. La intensidad de la relación entre dos elementos de un PC se mide como el número de transiciones entre ellos. Así pues, cada x_{ij} en la Ecuación 4 es el valor correspondiente en la serie de transición. En consecuencia, el Coste Relacional se calcula como el producto del número de transiciones entre cada par de elementos (x_{ij}) y la distancia entre ellos en el diseño (d_{ij}). La distancia entre los elementos se mide generalmente como la distancia euclidiana entre los centros geométricos de los elementos (Tompkins et al., 2010).

En el Coste Geométrico, g_i mide el cumplimiento de las restricciones geométricas del elemento i en el diseño del PC. Como se ha dicho anteriormente en la sección 5.1.4.1., el área ocupada por un elemento en el PC se considera rectangular y con una geometría flexible (la ratio geométrica del elemento i puede variar entre r_{\min_i} y r_{\max_i}). Para medir el cumplimiento de esta condición el valor, g_i es 0 si la ratio geométrica del elemento i en el diseño se encuentra dentro del rango $[r_{\min_i}, r_{\max_i}]$. En otros casos, se incrementa proporcionalmente el valor g_i , al extremo más cercano de ese rango.

Se ponderan los Costes Relacional y Geométrico empleando los coeficientes **Rc** y **Gc**. Variando estos coeficientes, el diseñador será capaz de asignar más o menos importancia a cada criterio. Finalmente, para considerar otros criterios, pueden añadirse más términos a la Ecuación 4. Por ejemplo, para permitir que algunos elementos, tales como botones de pánico o alarmas de emergencia, ocupen una posición especial en el diseño del PC.

5.1.5. Aplicación Experimental

Se llevó a cabo un experimento para verificar el funcionamiento del procedimiento propuesto. Se implementó un PC para controlar procesos habituales en un barco usando un software de simulación (Figura 6a). El software detecta las acciones sobre los controles y un modelo del proceso controlado calcula y muestra las respuestas en los correspondientes indicadores del PC. El PC estaba compuesto por 16 ventanas hijas ajustables en tamaño dentro de una ventana padre que ocupaba toda la pantalla de la PVD. Cada ventana hija contenía un control o un indicador mostrando información sobre el proceso (por ejemplo, velocidad, dirección, ruta, radar, estado de los motores, comunicaciones, etc.). Se usaron cuatro tipos de indicadores: pantallas numéricas, teclados para marcar números, gráficos y medidores. Los controles eran barras deslizantes y botones.

En los últimos años han sido mejorados considerablemente los dispositivos de rastreo ocular. En la actualidad, independientemente de utilizar dispositivos especializados costosos, el software de rastreo ocular de coste bajo es compatible con hardware de

productos tales como teléfonos móviles, tabletas, o cámaras online, sin requerir sensores o dispositivos adicionales (Cai et al., 2017). La selección del dispositivo apropiado para cada aplicación debe considerar las ventajas y desventajas de ambos tipos de dispositivo, tales como precisión, solidez, necesidad de calibración o precio (Titz et al., 2018). Para este experimento se empleó, un dispositivo de rastreo ocular Tobii TX300. Este rastreador de la mirada permite la observación de datos a 300 Hz con un rango de precisión de 0,5° y una desviación <0,03°, y está integrado en un monitor TFT de 23'' que fue empleado como PVD para mostrar el PC. Para registrar y analizar los datos del rastreo ocular y llevar a cabo el proceso de calibración se empleó el software de análisis Tobii Pro Studio.

Identificación	Área (%)				Ratio			
	Inicial	Mín	Máx	Final	Inicial	Mín	Máx	Final
AOI-1	2,21	2	6	2,30	1,02	0,20	2,00	0,25
AOI-2	5,03	2	6	2,38	0,79	0,20	2,00	0,26
AOI-3	4,95	2	6	3,59	0,44	0,20	1,00	0,39
AOI-4	12,81	2	14	7,08	0,62	0,20	5,00	4,49
AOI-5	3,64	2	6	3,62	1,10	0,90	1,10	0,97
AOI-6	7,57	3	8	4,82	1,07	0,70	1,43	0,73
AOI-7	5,95	2	6	2,34	2,04	1,00	5,00	3,76
AOI-8	8,30	2	14	2,42	0,69	0,20	1,00	0,27
AOI-9	3,63	3	8	7,08	1,09	0,20	5,00	4,49
AOI-10	5,81	4	14	11,86	1,35	1,00	2,00	1,30
AOI-11	6,83	4	14	10,82	0,12	0,10	0,50	0,32
AOI-12	6,00	4	14	10,69	3,41	2,00	10,00	2,97
AOI-13	12,81	4	14	9,59	0,61	0,50	2,00	0,93
AOI-14	6,00	4	14	10,69	3,15	2,00	10,00	2,97
AOI-A	6,46	2	8	4,75	0,61	0,20	2,00	0,30
AOI-B	2,00	2	8	5,98	1,35	0,20	2,00	0,37

Tabla 7. Características de los elementos a ser configurados en el caso de estudio. Las columnas inicial y final muestran el área y la ratio geométrica de cada AOI en el diseño inicial y final. Las columnas Mín y Máx muestran las restricciones geométricas de cada AOI.

Empleando este software, se definió una **AOI** para cada una de las ventanas hijas del PC. Las **AOI-1** hasta **AOI-9** corresponden a los indicadores, mientras que para los controles fueron definidos del **AOI-10** al **AOI-14**. Fueron definidas como **AOI-A** y **AOI-B** dos **AOIs** nombradas sobre elementos relativos a los sistemas de comunicación. En la Figura 6ª, se muestran el diseño inicial del PC y la correspondiente a las **AOIs**. En las columnas segunda y

sexta de la Tabla 7 se muestran la ratio y el área de cada elemento, como porcentajes sobre el total de la PVD. Se establecieron los valores mínimos y máximos para las áreas y la ratio de cada elemento. Estos valores dependen del tipo y usabilidad del elemento. Por ejemplo, las ratios mínimas y máximas de los deslizadores verticales deben ser mayores a 1, mientras que la ratio de los deslizadores horizontales debe ser menor a 1. De la misma forma, algunos indicadores necesitan áreas pequeñas para mostrar información, mientras que algunos controladores necesitan áreas grandes para ser apropiadamente operados. En la Tabla 7 se muestran los valores mínimos y máximos para las áreas y las ratios.

Se estableció una secuencia de 20 tareas a ser llevadas a cabo en el PC incluyendo operaciones comunes y críticas, y se relacionaron 20 usuarios con experiencia en el uso de este tipo de PCs para realizar el experimento.

5.1.5.1. Rastreo Ocular

Los 20 usuarios participaron en la primera sesión del experimento. Se explicó a los participantes el objetivo del experimento y los métodos básicos para utilizar el PC. Ellos llevaron a cabo algunas operaciones básicas en el PC durante 15 minutos para familiarizarse con su funcionamiento. A continuación, se les pidió desarrollar la secuencia predefinida con anterioridad, empleando el PC como se muestra en la Figura 6a. Fue mostrado el objetivo de cada tarea al participante en una pantalla ocupando el **AOI-A**. Cuando el participante consideró que la tarea se había completado, empleó el control en **AOI-B** para avisar al sistema, y la tarea siguiente se mostró en la pantalla **AOI-A**.

Finalmente, los participantes terminaron el Cuestionario del Post-Escenario (After Scenario Questionnaire ASQ) (Lewis, 1995) para medir la satisfacción de los usuarios. Este cuestionario consiste en 3 preguntas que los entrevistados deben responder usando una Escala de Likert de 7 puntos, cuyo rango varía desde 1 (fuertemente de acuerdo) a 7 (fuertemente en desacuerdo). Las tres preguntas son: 1. En general, estoy satisfecho con la facilidad para completar esta tarea, 2. En general, estoy satisfecho con la cantidad de tiempo que me llevó completar esta tarea, 3. En general, estoy satisfecho con la información de apoyo (ayudas en línea, mensajes, documentación) al completar la tarea. La Puntuación ASQ se obtiene como la media aritmética de las tres respuestas.

La información recogida del rastreo ocular y el movimiento del ratón de todos los usuarios fue utilizada para obtener la sesión de transición entre **AOIs**. Los datos obtenidos del Tobii Pro Studio para cada participante fueron analizados para calcular el porcentaje del tiempo de permanencia (PDT) en cada **AOI** y para obtener las transiciones de miradas entre las **AOIs** del PC. Únicamente los tiempos de permanencia por encima de 300 milisegundos

fueron considerados para calcular las transiciones entre **AOIs**. Consecuentemente, no se consideraron como transiciones aquellas miradas fijas cortas sobre **AOIs** realizadas mientras los usuarios buscaban el siguiente elemento.

Por otra parte, fueron analizados los eventos del ratón registrando cuantas veces pulsaba sobre cada **AOI**. Al comparar el rastreo ocular y los eventos de click del ratón, se registraron los casos en los cuáles los participantes pulsaron en una **AOI** mientras miraban a otra. La Figura 8 muestra el mapa de calor del rastreo ocular y movimientos del ratón (Blascheck et al., 2014) de uno de los usuarios. Este mapa muestra la agregación de las fijaciones de la mirada a lo largo del tiempo, los movimientos del ratón (líneas blancas) y los clicks del ratón (círculos amarillos). Los resultados de estos análisis fueron empleados para construir la matriz de transición. El número promedio de transiciones entre **AOIs** fue calculado en la Tabla 8 para todos los usuarios. Estos valores incluyen las transiciones mirada- mirada y las transiciones mirada – ratón. En la Tabla 8 se muestran entre paréntesis las transiciones mirada- ratón.

Las áreas y ratios mínimas y máximas para cada elemento del PC mostradas en la Tabla 7, y la matriz de transición entre **AOIs** (Tabla 8), fueron utilizadas en un AG basado en árbol de cortes (Diego-Mas et al., 2009) para obtener un diseño óptimo de los elementos. La función de aptitud del AG se representa en la Ecuación 4. En esta ecuación, n adquirió el valor 16 (número de elementos en el PC) y los valores establecidos para el Coste Relacional (CR) y el Coste Geométrico (CG) fueron 1 y 2, respectivamente. El AG empleado es un algoritmo en dos etapas y ambas etapas se ejecutaron durante 1000 generaciones. La probabilidad de cruce se estableció en 0,9 y la probabilidad de mutación en 0,01. El tamaño de la población fue de 50. El tiempo que llevó el proceso de cálculo fue de 4 minutos y 58 segundos en un PC con 12 GB de memoria RAM y procesador de 3,6 GHz.

5.1.5.2. Segunda sesión del experimento

En la segunda sesión del experimento, los usuarios fueron aleatoriamente separados en dos grupos de 10 miembros (grupo A y grupo B). Se les pidió a los miembros del grupo A reorganizar manualmente la distribución de las ventanas hijas que contenían los elementos del PC. Ellos debían tener en cuenta su experiencia en el primer experimento para adaptar la distribución a sus preferencias y necesidades cambiando la posición y el tamaño de los elementos. Después, se les pidió que realizaran otra vez las mismas tareas empleando la nueva distribución. Por otro lado, los miembros del grupo B desarrollaron la misma secuencia empleando la mejor distribución obtenida por el algoritmo (Figura 9). Nuevamente, fueron registrados el tiempo para completar cada tarea, los datos del rastreo ocular y los eventos del ratón de todos los usuarios, y todos ellos completaron el ASQ.

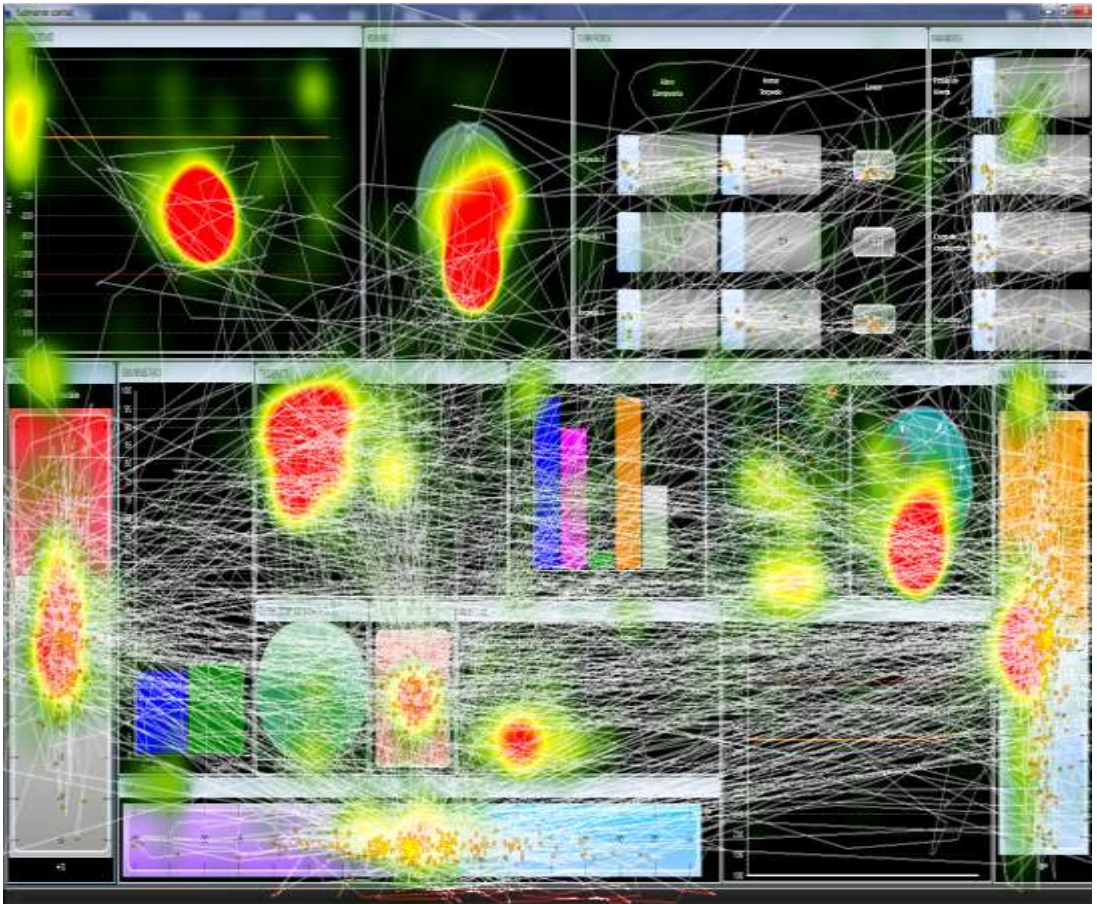


Figura 8. Mapa de calor del rastreo ocular y recorrido del ratón de un usuario. El color rojo representa áreas con un gran número de miradas fijas a lo largo del tiempo. La línea blanca es el recorrido del ratón y los círculos amarillos son los clicks del ratón. (Para interpretar las referencias a color en la leyenda de esta figura, se remite al lector a la versión online de este artículo).

5.1.6. Resultados

La Figura 9 muestra el diseño inicial del PC y el mejor diseño obtenido por el AG. Las líneas negras representan la intensidad de las relaciones entre los elementos del PC tal como se indica en la matriz de transición (Tabla 8). Cuanto mayor es el grosor de la línea entre las **AOIs**, mayor es la relación entre ellas. En la solución óptima, los elementos con relaciones intensas son adyacentes o se encuentran más cercanos entre sí que, en el diseño inicial, por ejemplo, **AOI-4** y **AOI-12**. En la Figura 9 se muestran también las ratios de aspecto de todos los elementos (r) en la solución final. Las ratios de aspecto de todos los elementos se encuentran entre la ratio mínima y máxima (Tabla 8). Así pues, se cumplen las restricciones geométricas de todos los ítems y el Coste Geométrico (Ecuación 4) de la solución es 0, de

tal forma que el Coste General de la solución está dado por el Coste Relacional. Varios Costes Relacionales del diseño calculado mediante la Ecuación 4 son 5619,6 para el diseño inicial y 3798,0 para el diseño óptimo; así pues, la solución obtenida con AG logró una reducción del 32,6% en el Coste Relacional.

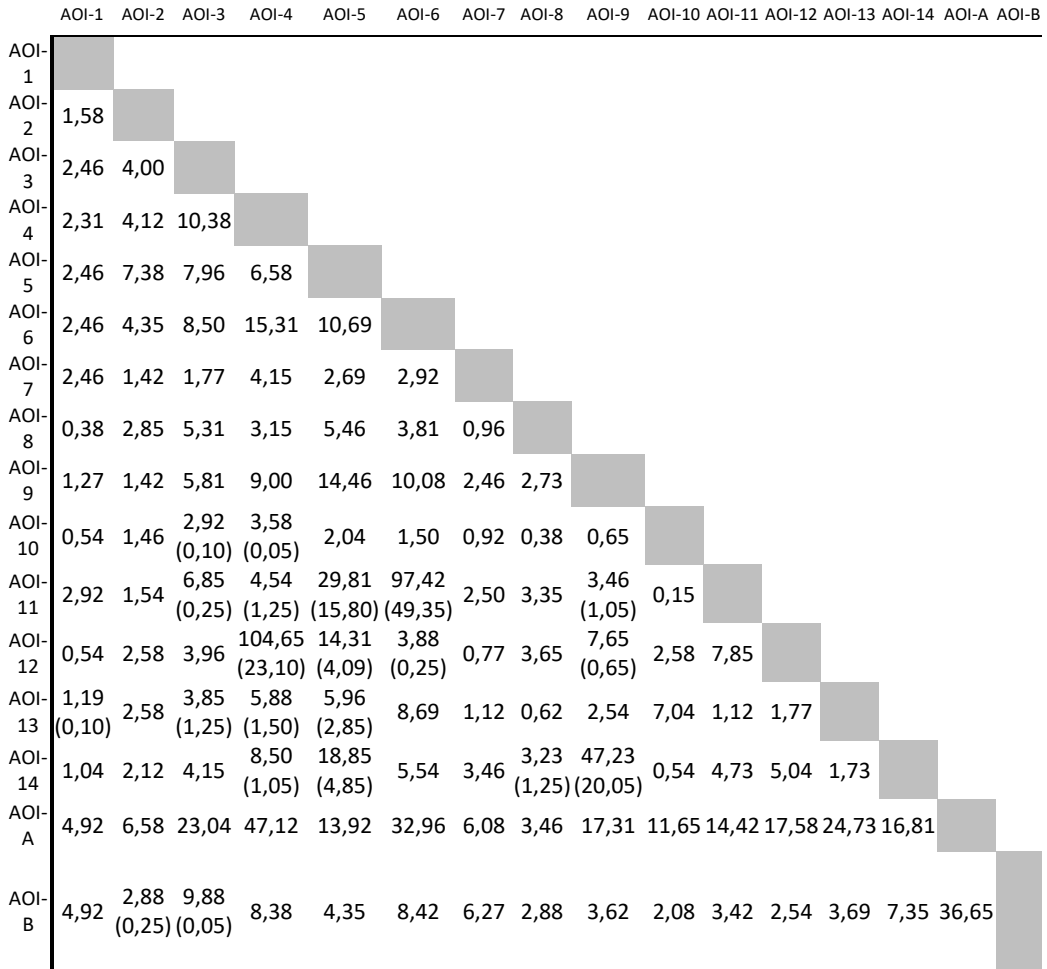


Tabla 8. Matriz de transición de la PC empleada en las sesiones experimentales. Cada celda representa el número promedio de transiciones de mirada – mirada y mirada – ratón entre las AOIs. Se muestran entre paréntesis las transiciones mirada- ratón.

La Tabla A1 mostrada en el apéndice A presenta los resultados completos por operarios para ambas sesiones del experimento. La Figura 10 presenta los datos agregados por cada sesión experimental, mostrando los valores medios de la duración total de las tareas, los

errores cometidos, la puntuación ASQ, el número de clics del ratón y la longitud del recorrido del ratón para ambos grupos del experimento. A la hora de calcular el número de errores cometidos por los usuarios durante el experimento, se tuvieron en cuenta dos tipos de errores. El primer tipo consistió en no alcanzar el objetivo de una tarea dentro de la secuencia de tareas predefinidas. El segundo tipo de error consistió en usar inicialmente un control inadecuado para desarrollar la tarea, aunque el objetivo de la tarea fuera finalmente alcanzado.

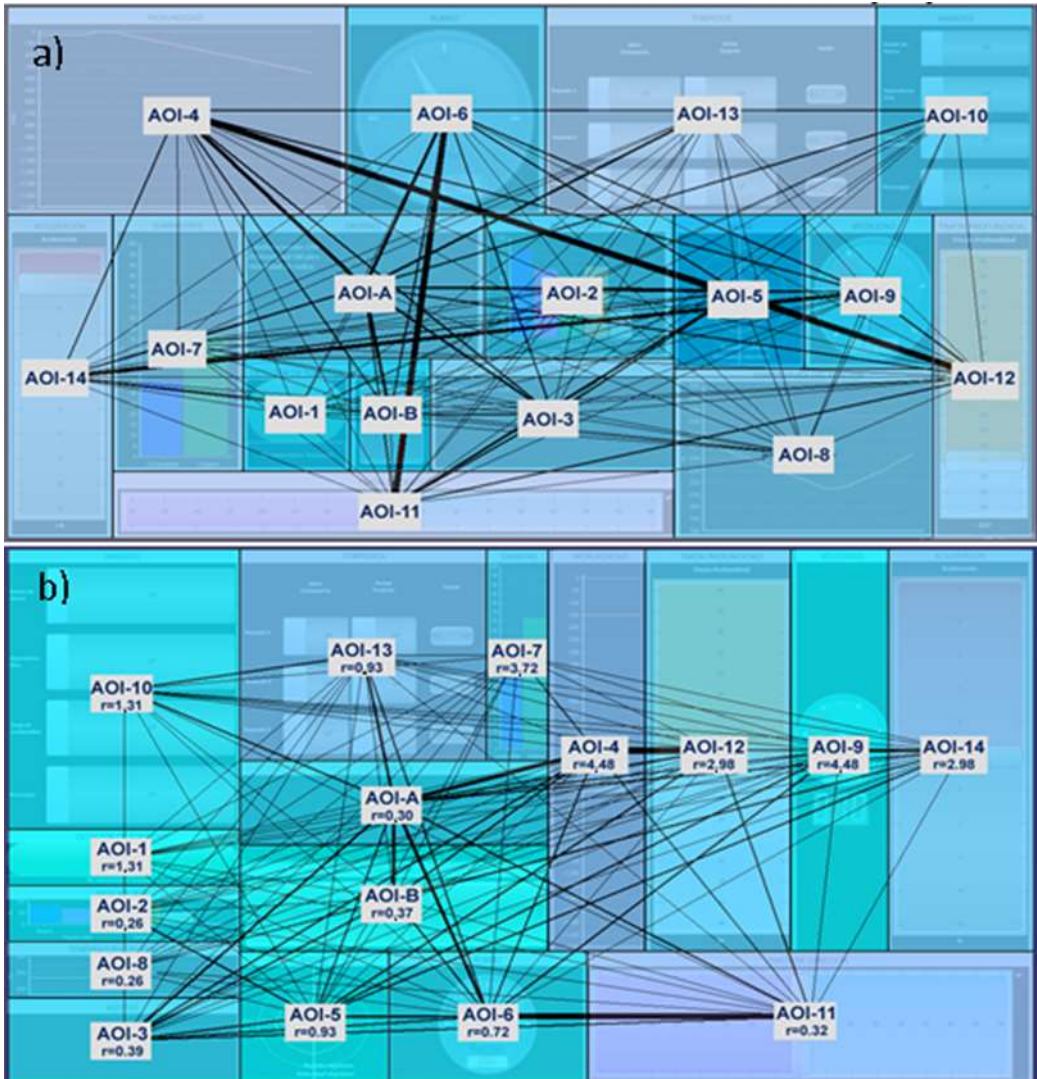


Figura 9. Diseño inicial del PC (a) y diseño óptimo (b) obtenidas por el AG. Las ratios (r) de altura-anchura se muestran para cada elemento del PC.

Para comparar el valor de los indicadores entre sesiones, se llevaron a cabo pruebas t dependientes de la muestra, con un valor de ($\alpha=0,05$). La Tabla A2 del apéndice A muestra la media y la desviación típica de los valores de los indicadores por cada sesión del experimento y por cada grupo, así como los valores t y el cambio porcentual en indicadores por grupos.

Considerando a todos los participantes en ambas sesiones experimentales, se encontraron diferencias significativas en todos los indicadores entre ambas sesiones. Por grupos, el valor medio de la duración de la tarea disminuyó un 26,70% para el grupo A y un 37,70% para el grupo B. La diferencia en la reducción del número de errores fue superior: mientras los participantes del grupo A redujeron los errores en un 17,19%, los del grupo B lo hicieron en un 34,78%. Por otro lado, se presentó una pequeña reducción en la puntuación ASQ entre las sesiones para el grupo A (1,03 %), la cual no fue significativa.

La puntuación ASQ de los usuarios del Grupo B disminuyó un 13,5%. Debido a la Escala de Likert empleada en este cuestionario, los valores bajos en estas puntuaciones corresponden a niveles altos de satisfacción. El número de clicks del ratón necesarios para llevar a cabo las tareas disminuyó en un 9,16% en el Grupo A, y en un 15,65% en el Grupo B, y la longitud de la trayectoria del ratón se redujo en un 32,59% en el Grupo A, y en un 39,69% en el Grupo B.

Finalmente, se calcularon los coeficientes de la correlación producto- momento de Pearson para medir la relación de todos los indicadores entre sesiones para todos los participantes. Hubo correlaciones positivas entre la duración de la tarea ($r = 0,506$, $n = 20$, $p = 0,023$), número de errores ($r = 0,807$, $n = 20$, $p = 0,000$), puntuación ASQ ($r = 0,767$, $n = 20$, $p = 0,000$) y número de clicks de ratón ($r = 0,691$, $n = 20$, $p = 0,001$), para todos los participantes entre sesiones. Se encontró una correlación baja y no significativa para la longitud de la trayectoria del ratón entre sesiones ($r = 0,117$, $n = 20$, $p = 0,625$). También se encontraron correlaciones positivas significativas entre las puntuaciones ASQ y la duración de la tarea en ambas sesiones ($r = 0,5443$, $n = 20$, $p = 0,013$) para la Sesión 1 y ($r = 0,5391$, $n = 20$, $p = 0,014$) para la Sesión 2, y entre puntuaciones ASQ y el número de errores ($r = 0,6995$, $n = 20$, $p = 0,001$) para la Sesión 1 y ($r = 0,7985$, $n = 20$, $p = 0,000$) para la Sesión 2.

5.1.7. Discusión

El objetivo principal del rediseño de una interfaz del usuario es mejorar su usabilidad. La Norma ISO 9241-11 (International Organization for Standardization, 1998) define usabilidad como: “el grado en que un producto puede ser empleado por operarios específicos para alcanzar objetivos con efectividad, eficiencia y satisfacción, en un contexto específico de

uso". En esta definición están involucrados tres aspectos diferentes: efectividad, eficacia y satisfacción. Cada uno de ellos debe ser medido empleando diferentes indicadores (Frokjær et al., 2000). Un buen indicador de efectividad son las tasas de error, los indicadores de eficiencia pueden incluir tiempos de finalización de la tarea, y para medir la satisfacción del usuario pueden emplearse las escalas de calificación de actitud.

En este caso se utilizaron las tasas de errores como indicador de efectividad, y la longitud de la trayectoria del ratón y el número de clicks que los usuarios necesitan para desempeñar las tareas en el PC, como indicadores de eficiencia. De forma intuitiva, ambos están relacionados con la cantidad de esfuerzo necesario para alcanzar los objetivos propuestos. Cuánto más larga sea la trayectoria del ratón y mayor el número de clicks del mismo, mayor será la cantidad de elecciones y de juicios relevantes que se requerirán por parte del usuario (Gwizdka and Spence, 2007). Por otro lado, pueden presentarse más clicks del ratón cuando el usuario usa de forma sucesiva un control para corregir un error previo, o cuando encuentra dificultades para utilizarlo apropiadamente. Estas relaciones han sido probadas en el contexto de la búsqueda online (Cox and Silva, 2006; Huang et al., 2011; Kim, 2006; Mueller and Lockerd, 2001), sin embargo, hasta donde sabemos, éstas deben ser probadas aún en otros tipos de interfaces.

Se seleccionó el ASQ (Lewis, 1995) para medir la satisfacción de los usuarios. Las encuestas típicas referentes a usabilidad y experiencias de usuarios (Tullis and Albert, 2013) evalúan diversos aspectos de las interfaces, tales como la secuencia de pantallas, la terminología, la facilidad de lectura, la ayuda y la documentación, la facilidad de aprendizaje en la interfaz, etc. El método presentado en este trabajo pretende obtener diseños óptimos de los elementos de una interfaz sin modificar sus características (excepto su posición y, en menor medida, su tamaño). No son modificados por este sistema el tipo de control e indicadores, u otras características tales como usabilidad o colores. ASQ es un cuestionario simple dirigido a determinar la satisfacción del usuario en estudios de usabilidad basado en escenarios. Por ello, se seleccionó para medir la satisfacción de los usuarios.

El experimento desarrollado en este trabajo ha demostrado que el AG empleado en el sistema propuesto es capaz de encontrar soluciones que tenga en cuenta las restricciones geométricas de los elementos de la interfaz. Dado que todas las restricciones geométricas se cumplen, la solución encontrada no tiene Coste Geométrico, y el Coste Total se debe entonces al Coste Relacional. Así pues, el diseño optimizado obtenido puede ser directamente implementada sin necesidad de ajustes manuales, alcanzando una reducción del 32,6% en el Coste Relacional.

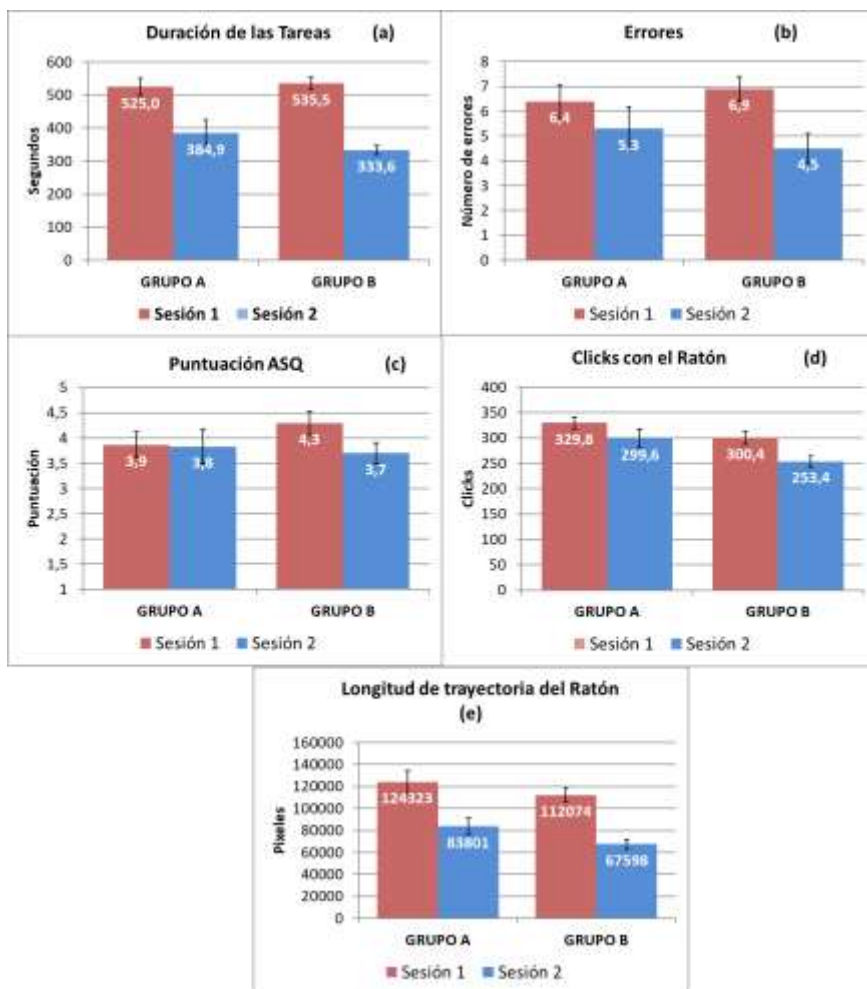


Figura 10. Resultados de las sesiones experimentales. Las barras muestran, para ambos grupos del experimento, los valores medios de la duración total de las tareas para cada sesión experimental (a), los errores cometidos (b), la puntuación ASQ (c), el número de clicks del ratón (d), y la longitud del recorrido del ratón (e). Las líneas de dispersión indican la desviación típica de la media.

Se llevaron a cabo dos sesiones experimentales con dos grupos (A y B) de 10 usuarios. Los 20 usuarios participaron en la primera sesión experimental, completando una secuencia de 20 tareas en un PC, organizado tal como se muestra en la Figura 6a. En la segunda sesión experimental, se les solicitó a los miembros del grupo A reorganizar manualmente el diseño del PC considerando sus experiencias de la primera sesión y desarrollar la misma secuencia de tareas. Los miembros del grupo B utilizaron el mejor diseño obtenido por el algoritmo (Figura 9). Se recogieron los datos del tiempo para completar la tarea, los errores

cometidos, los datos del rastreo ocular y los eventos del ratón para todos los usuarios, y todo esto no es necesario completando el ASQ.

La Figura 11 muestra el porcentaje de cambio en indicadores de usabilidad entre las sesiones. Los participantes estaban más familiarizados con la interfaz en la segunda sesión. Así pues, como es de esperar, todos los indicadores de usabilidad disminuyeron en la segunda sesión experimental. Debido a sus definiciones, los indicadores con valores bajos de usabilidad corresponden precisamente a niveles altos de ésta. La disminución fue más pronunciada para los usuarios que utilizaron el PC optimizado (Grupo B), que para aquellos que utilizaron su propio diseño (Grupo A). Las pruebas t con muestras dependientes ($\alpha = 0,05$) realizadas mostraron que fueron significativas las diferencias entre sesiones, excepto por la pequeña reducción en la puntuación ASQ para el Grupo A.

Estos resultados sugieren que el diseño obtenido para el PC, empleando el método propuesto en este trabajo, incrementa la efectividad, la eficiencia y la satisfacción del usuario, en comparación con otras configuraciones definidas por él mismo. Sin embargo, deben ser comparados los valores obtenidos entre los grupos antes de concluir que esta mejora se debe a diferentes diseños. Este hecho puede deberse también a diferentes habilidades, destrezas o capacidades de los participantes en cada grupo. Las pruebas t independientes ($\alpha = 0,05$) realizadas para comparar los indicadores entre grupos (Tabla A3) muestran que no se encontraron indicadores con valores significativamente diferentes entre grupos para la sesión experimental 1, cuando todos los usuarios utilizaron la misma interfaz, siendo los valores de duración de la tarea, errores y puntuación ASQ, más bajos para el Grupo A. En cambio, los valores medios de los indicadores fueron más altos para el grupo que utilizó la interfaz optimizada en la Sesión 2. Por lo tanto, se puede concluir que las diferencias en la efectividad, la eficiencia y la satisfacción del usuario entre grupos no se deben a las diferentes capacidades en sus miembros.

Los coeficientes de correlación producto-momento de Pearson se calcularon para medir la relación entre todos los indicadores entre sesiones para todos los participantes. En general, en todos los indicadores excepto en el caso de la longitud de la trayectoria del ratón, en la medida que el resultado obtenido en la primera sesión mejora, el obtenido en la segunda también. Este resultado muestra que las habilidades, destrezas y preferencias individuales de los participantes afectan significativamente a la efectividad, eficiencia y satisfacción cuando se utiliza la interfaz, independientemente de su configuración. Por otro lado, la longitud de la trayectoria del ratón por cada usuario, no muestra correlación entre sesiones. Mientras los usuarios de la interfaz están buscando el control o indicador correcto, el cursor del ratón los ayuda con la búsqueda visual usando el puntero como

marcador (Cox and Silva, 2006). La Figura 12 muestra el recorrido del ratón para un participante de las sesiones. Aunque este aspecto necesita una investigación más específica, la longitud de la trayectoria del ratón puede ser un indicador de la familiaridad con la tarea a ser desarrollada empleando el PC (Todi et al., 2018), y su variación entre sesiones para ser independientes de la habilidad o destreza del usuario. Esto es consistente con algunos estudios previos sobre búsqueda online (Huang et al., 2011; Liu et al., 2010; Mueller and Lockerd, 2001).

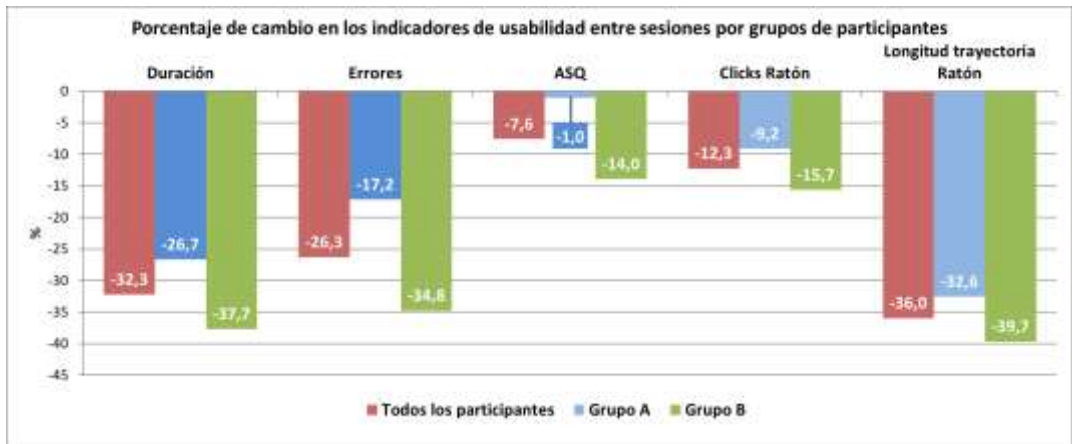


Figura 11. Cambio porcentual en los valores promedio de los indicadores de usabilidad, entre sesiones, por grupos de usuarios.

El procedimiento propuesto en este trabajo pretende optimizar el diseño de las interfaces basadas en software, tales como paneles de control o aplicaciones con menús y barras de herramientas personalizables para mejorar su usabilidad. Esta propuesta utilizar el rastreo ocular y el rastreo del ratón, técnicas no invasivas que permiten recopilar los datos requeridos por el AG para obtener nuevos diseños, los operarios desempeñan sus tareas habituales. Así pues, el sistema puede ser empleado para generar interfaces estáticas o adaptables de usuario (Gajos et al., 2006a; Todi et al., 2008). Las interfaces estáticas del usuario se mantienen sin cambios una vez son diseñadas e implementadas. Pueden obtenerse los datos para optimizar interfaces estáticas a partir de los usuarios durante un intervalo de tiempo de funcionamiento normal del PC o durante sesiones experimentales controladas. Por otro lado, pueden modificarse las interfaces adaptables del usuario, mientras estén siendo empleadas con base en la interacción histórica con los usuarios. Este sistema puede proponer nuevas configuraciones optimizadas de forma automatizada basadas en los datos recogidos permanentemente de los usuarios durante el funcionamiento normal del PC.

Adicionalmente, es posible utilizar los datos recogidos de los usuarios individuales para encontrar interfaces personalizadas por usuario, o datos de varios usuarios para obtener un diseño común optimizado para algunos de ellos. El uso de interfaces de usuario personalizadas para cada usuario, toma en cuenta las habilidades y los requerimientos de usuarios específicos (Gajos et al., 2006b; Gamecho et al., 2015; Nichols et al., 2006; Nichols and Laau, 2008). De la misma forma, es posible obtener interfaces personalizadas por tarea empleando los datos recogidos, mientras los usuarios están llevando a cabo tareas específicas (Gajos et al., 2006a).

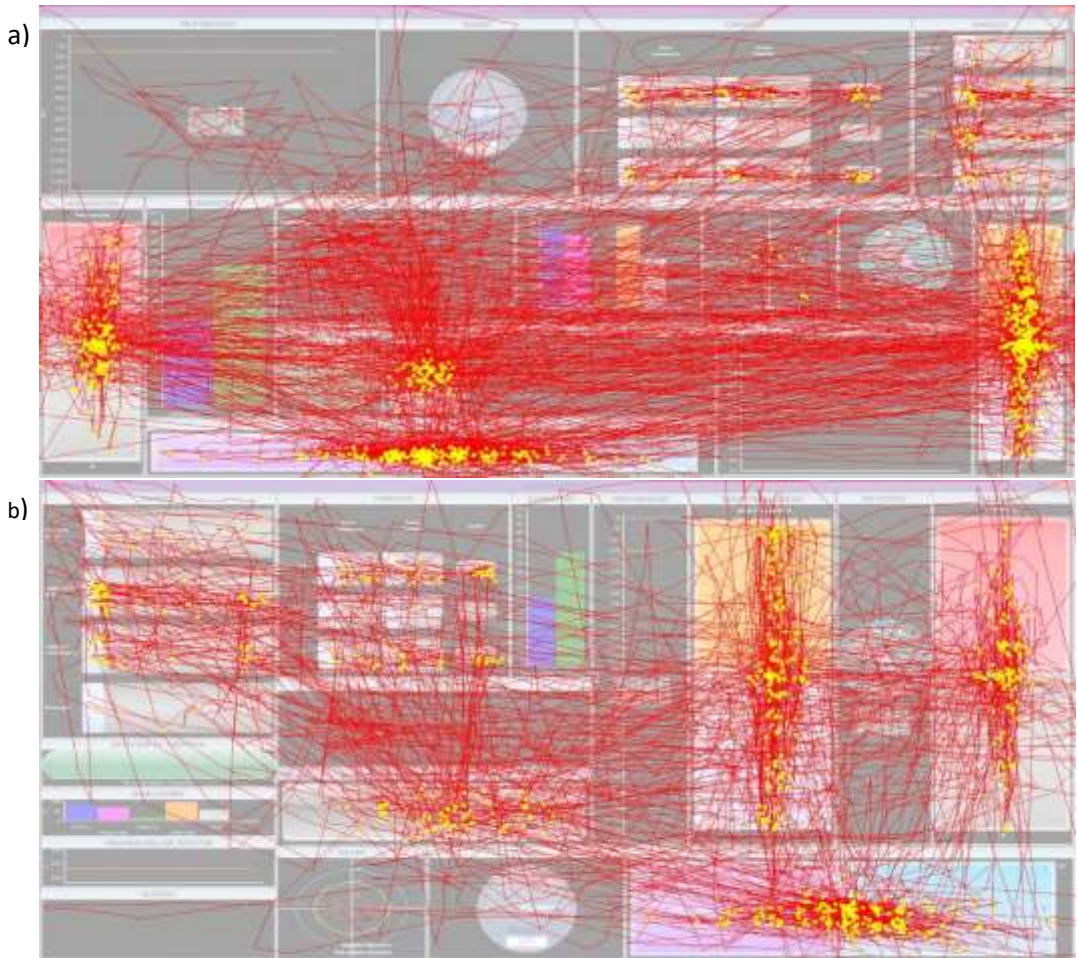


Figura 12. Recorrido del ratón (líneas rojas) y clics (puntos amarillos) de un participante del Grupo B en ambas sesiones experimentales. (a) Sesión experimental 1 con el diseño inicial del PC. (b) Sesión experimental 2 con el diseño final de la PC obtenida por el AG. (Para interpretación de las referencias a colores en esta leyenda, se remite al lector en la versión online de este artículo).

Se indica a continuación algunas limitaciones del procedimiento propuesto. El planteamiento actual utiliza la intensidad de la relación entre dos elementos del PC y la distancia entre ellos en el diseño para calcular el Coste Relacional que el AG debe minimizar. Se mide la intensidad de la relación entre dos elementos del PC empleando el número de transiciones entre ellos. Aquí se han considerado dos tipos de relaciones: transiciones mirada – mirada y transiciones mirada – ratón. Actualmente, son igualmente ponderados ambos tipos de transiciones en la función de aptitud, dándoles la misma importancia a la hora de obtener el diseño óptimo. Las investigaciones futuras deben estudiar si la utilización de diferentes coeficientes de ponderación para cada uno de ellos puede llevar a mejorar la usabilidad del PC obtenido, y cómo esto afecta a la efectividad, eficiencia y la satisfacción del usuario.

5.1.8. Conclusiones

En este trabajo se ha empleado información del rastreo ocular y del rastreo del ratón para optimizar el diseño de los elementos en un PC, empleando AGs basados en árbol de cortes. El algoritmo empleado considera las restricciones geométricas de los elementos de la interfaz durante la búsqueda del diseño óptimo. Así pues, puede ser directamente implementada la solución obtenida sin la necesidad de ajustes manuales que distorsionen el diseño. Los resultados del experimento muestran que los diseño obtenidos empleando este método superan las configuraciones de las interfaces definidas por el usuario en efectividad, eficiencia y satisfacción del usuario.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Programa estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los retos de la sociedad del Gobierno de España bajo la Subvención DPI2016-79042-R.

5.1.9. Referencias

- Alluisi, E.A., Morgan, B.B., 1976. Engineering Psychology and Human Performance. *Annu. Rev. Psychol.* 27, 305–330. doi:10.1146/annurev.ps.27.020176.001513
- Alppay, C., Bayazit, N., 2015. An ergonomics based design research method for the arrangement of helicopter flight instrument panels. *Appl. Ergon.* 51, 85–101. doi:10.1016/j.apergo.2015.04.011
- Blascheck, T., Kurzhals, K., Raschke, M., Burch, M., Weiskopf, D., Ertl, T., 2014. State-of-the-Art of Visualization for Eye Tracking Data. *Eurographics Conf. Vis.* 1–20. doi:10.2312/eurovisstar.20141173
- Cai, H., Liu, B., Zhang, J., Chen, S., Liu, H., 2017. Visual focus of attention estimation using eye center localization. *IEEE Syst. J.* 11, 1320-1325.
- Carvalho, P.V.R., dos Santos, I.L., Gomes, J.O., Borges, M.R.S., Guerlain, S., 2008. Human factors approach for evaluation and redesign of human-system interfaces of a nuclear power plant simulator. *Displays* 29, 273–284. doi:10.1016/j.displa.2007.08.010
- Chapanis, A., 1996. *Human factors in systems engineering*. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.
- Cox, A.L., Silva, M.M., 2006. The Role of Mouse Movements in Interactive Search. *Proc. Cogn. Sci. Soc.* 28.
- Degani, A., Palmer, E.A., Bauersfeld, K.G., 1992. “Soft” Controls for hard displays: still a challenge. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 36, 52–56. doi:10.1177/154193129203600114
- Diego-Mas, J.A., Poveda-Bautista, R., Garzon-Leal, D., 2017. Using RGB-D sensors and evolutionary algorithms for the optimization of workstation layouts. *Applied Ergonomics.* 65, 530-540.
- Diego-Mas, J.A., Santamarina-Siurana, M.C., Alcaide-Marzal, J., Cloquell-Ballester, V.A., 2009. Solving facility layout problems with strict geometric constraints using a two-phase genetic algorithm. *Int. J. Prod. Res.* 47, 1679–1693. doi:http://dx.doi.org/10.1080/00207540701666253">http://dx.doi.org/10.1080/00207540701666253
- Diego-Mas, J.A., Santamarina-Siurana, M.C., Cloquell-Ballester, V.A., Alcaide-Marzal, J., 2008. Slicing tree’s geometric potential: an indicator for layout problems based on

slicing tree structure. *Int. J. Prod. Res.* 46, 1071–1087.
doi:10.1080/00207540600932061

El-Baz, M.A., 2004. A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments. *Comput. Ind. Eng.* 47, 233–246.
doi:10.1016/j.cie.2004.07.001

Foley, J.D., Kim, W.C., Kovacevic, S., Murray, K., 1991. UIDE - An intelligent user interface design environment, in: *Architectures for Intelligent Interfaces: Elements and Prototypes*. pp. 339–384. doi:10.1145/107215.128716

Francis, G., 2000. Designing Multifunction Displays: An Optimization Approach. *Int. J. Cogn. Ergon.* 4, 107–124. doi:10.1207/S15327566IJCE0402_2

Frøkjær, E., Hertzum, M., Hornbæk, K., 2000. Measuring Usability: Are Effectiveness, Efficiency, and Satisfaction Really Correlated? *ACM CHI 2000 Conf. Hum. Factors Comput. Syst.* 2, 345–352. doi:10.1145/332040.332455

Gajos, K.Z., Czerwinski, M., Tan, D.S., Weld, D.S., 2006a. Exploring the design space for adaptive graphical user interfaces. In: *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces - AVI*. 06, 201. <https://doi.org/10.1145/1133265>. 1133306.

Gajos, K.Z., Long, J.J., Weld, D.S., 2006b. Automatically generating custom user interfaces for users with physical disabilities. In: *Proc. 8th Int. ACM SIGACCESS Conf. Comput. Access. - Assets*. 06, 243. <https://doi.org/10.1145/1168987.1169036>.

Gamecho, B., Minon, R., Aizpurua, A., Cearreta, I., Arrue, M., Garay-Vitoria, N., Abascal, J., 2015. Automatic generation of tailored accessible user interfaces for ubiquitous services. *IEEE Trans. Human-Machine Syst.* 45, 612–623. <https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2384452>.

Geman, S., Geman, D., 1984. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* PAMI-6, 721–741. doi:10.1109/TPAMI.1984.4767596

Goldberg, D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, Boston, MA.

Goldberg, J.H., Kotval, X.P., 1999. Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *Int. J. Ind. Ergon.* 24, 631–645. doi:10.1016/S0169-8141(98)00068-7

- Gwizdka, J., Spence, I., 2007. What Can Searching Behavior Tell Us About the Difficulty of Information Tasks? A Study of Web Navigation. *Proc. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 43, 1–22. doi:10.1002/meet.14504301167
- Harris, R.L., Glover, B.L., Spady, A.A., 1986. Analytic techniques of pilot scanning behavior and their application. (NASA Tech. Rep. No. 2525). Hampton, VA.
- Helleberg, J.R., Wickens, C.D., 2003. Effects of data-link modality and display redundancy on pilot performance: An attentional perspective. *Int. J. Aviat. Psychol.* 13, 189–210. doi:10.1207/S15327108IJAP1303_01
- Hessels, R.S., Kemner, C., van den Boomen, C., Hooge, I.T.C., 2016. The area-of-interest problem in eyetracking research: A noise-robust solution for face and sparse stimuli. *Behav. Res. Methods* 48, 1694–1712. doi:10.3758/s13428-015-0676-y
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press. Ann Arbor.
- Holman, G.T., Carnahan, B.J., Bulfin, R.L., 2003. Using linear programming to optimize control panel design from an ergonomics perspective. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 47, 1317–1321. doi:10.1177/154193120304701047
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., van de Weijer, J., 2011. *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford University Press, Oxford.
- Horberry, T.J., Burgess-Limerick, R., Steiner, L.J., 2010. Controls and displays, in: *Human Factors for the Design, Operation, and Maintenance of Mining Equipment*. pp. 119–144. doi:doi:10.1201/9781439802335-c8
- Hosseini-Nasab, H., Emami, L., 2013. A hybrid particle swarm optimisation for dynamic facility layout problem. *Int. J. Prod. Res.* 51, 4325–4335. doi:10.1080/00207543.2013.774486
- Huang, J., White, R.W., Dumais, S., 2011. No clicks, no problem: Using cursor movements to understand and improve search. *Proc. 29th SIGCHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst.* 1225. doi:10.1145/1978942.1979125
- Hwang, S.L., Liang, S.F.M., Liu, T.Y.Y., Yang, Y.J., Chen, P.Y., Chuang, C.F., 2009. Evaluation of human factors in interface design in main control rooms. *Nucl. Eng. Des.* 239, 3069–3075. doi:10.1016/j.nucengdes.2009.09.006

- International Organization for Standardization, 1998. ISO 9241-11: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - part 11: guidance on usability. Int. Organ. Stand. 1998, 28. doi:10.1038/sj.mp.4001776
- International Organization for Standardization, 2008. Ergonomic design of control centres — Part 5: Displays and controls.
- James, T., Rego, C., Glover, F., 2009. Multistart tabu search and diversification strategies for the quadratic assignment problem. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans 39, 579–596. doi:10.1109/TSMCA.2009.2014556
- Kantowitz, B.H., Sorkin, R.D., 1983. Human factors: understanding people-system relationships. Wiley, New York.
- Karn, K.S., Ellis, S., Juliano, C., 1999. Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring, in: CHI '99 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems - CHI. 99, 173. doi:10.1145/632716.632823
- Karrenbauer, A., Oulasvirta, A., 2014. Improvements to keyboard optimization with integer programming. In: Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology-UIST. 14, 621–626. <https://doi.org/10.1145/2642918.2647382>.
- Kim, J., 2006. Task difficulty as a predictor and indicator of web searching interaction. Proc. ACM CHI 2006 Conf. Hum. Factors Comput. Syst. 2, 959–964. doi:10.1145/1125451.1125636
- Kim, W.C., Foley, J.D., 1990. DON: user interface presentation design assistant, in: UIST. Third Annual Symposium on User Interface Software and Technology. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium, Snowbird, Utah, USA, October 3--5, 1990. pp. 10–20. doi:10.1145/97924.97926
- Kroemer, K.H.E., Kroemer, H.B., Kroemer-Elbert, K.E., 2001. Ergonomics: How to design for ease and efficiency. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Küçükoğlu, İ., Öztürk, N., 2017. Two-stage optimisation method for material flow and allocation management in cross-docking networks. Int. J. Prod. Res. 55, 410–429. doi:10.1080/00207543.2016.1184346
- Kulturel-Konak, S., Konak, A., 2015. A large-scale hybrid simulated annealing algorithm for cyclic facility layout problems. Eng. Optim. 47, 963–978.

doi:10.1080/0305215X.2014.933825

Kusiak, A., Heragu, S.S., 1987. The facility layout problem. *Eur. J. Oper. Res.*
doi:10.1016/0377-2217(87)90238-4

Lewis, J.R., 1995. IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 7, 57–78.
doi:10.1080/10447319509526110

Lin, C.-J., Wu, C., 2010. Improved link analysis method for user interface design – modified link table and optimisation-based algorithm. *Behav. Inf. Technol.* 29, 199–216.
doi:10.1080/01449290903233892

Liu, J., Gwizdka, J., Liu, C., Belkin, N.J., 2010. Predicting task difficulty for different task types. *Proc. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 47, 1–10. doi:10.1002/meet.14504701173

Martin, C., Cegarra, J., Averty, P., 2011. Analysis of Mental Workload during En-route Air Traffic Control Task Execution Based on Eye-Tracking Technique. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 592–597. doi:10.1007/978-3-642-21741-8_63

McKendall, A.R., Liu, W.-H., 2012. New Tabu search heuristics for the dynamic facility layout problem. *Int. J. Prod. Res.* 50, 867–878. doi:10.1080/00207543.2010.545446

Merz, P., Freisleben, B., 1999. A comparison of memetic algorithms, tabu search, and ant colonies for the quadratic assignment problem. *Proc. 1999 Congr. Evol. Comput. Cat No 99TH8406 3*, 2063–2070. doi:10.1109/CEC.1999.785529

Mueller, F., Lockerd, A., 2001. Cheese: tracking mouse movement activity on websites, a tool for user modeling. *CHI'01 Ext. Abstr. Hum. factors ...* 279–280.
doi:10.1145/634067.634233

Nachreiner, F., Nickel, P., Meyer, I., 2006. Human factors in process control systems: The design of human-machine interfaces, in: *Safety Science*. pp. 5–26.
doi:10.1016/j.ssci.2005.09.003

Nichols, J., Lau, T., 2008. Mobilization by demonstration: using traces to re-author existing web sites. In: *Proc. 13th Int. Conf.* 149–158.
<https://doi.org/10.1145/1378773.1378793>.

Nichols, J., Myers, B.A., Rothrock, B., 2006. UNIFORM: automatically generating consistent remote control user interfaces. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human*

Factors in Computing Systems, 611–620. <https://doi.org/10.1145/1124772.1124865>

Önüt, S., Tuzkaya, U.R., Doğaç, B., 2008. A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem. *Comput. Ind. Eng.* 54, 783–799. doi:10.1016/j.cie.2007.10.012

Oulasvirta, A., 2017a. Optimizing user interfaces for human performance. In: *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer, Cham, 3–7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72038-8_1.

Oulasvirta, A., 2017b. User interface design with combinatorial optimization. *Computer (Long. Beach. Calif)*. 50, 40–47. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.6>.

Oulasvirta, A., Kristensson, P.O., Bi, X., Howes, A. (Eds.), 2018. *Computational Interaction*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198799603.001.0001>.

Pernice, K., Nielsen, J., Usability, E., Using, S., 2009. *Eyetracking Methodology: How to Conduct and Evaluate Usability Studies Using Eyetracking*. Notes 1–17.

Raeisi, S., Osqueizadeh, R., Maghsoudipour, M., Jafarpisheh, A.S., 2016. Ergonomic redesign of an industrial control panel. *Int. J. Occup. Environ. Med.*

Saifullah Hussin, M., Stützle, T., 2014. Tabu search vs. simulated annealing as a function of the size of quadratic assignment problem instances. *Comput. Oper. Res.* 43, 286–291. doi:10.1016/j.cor.2013.10.007

Sanders, M.S., McCormick, E.J., 1993. *Human factors in engineering and design*, New York: McGraw-Hill .

Srinivas, M., Patnaik, L.M., 1994. Genetic algorithms: a survey. *Computer (Long. Beach. Calif)*. 27. doi:10.1109/2.294849

Stainer, M.J., Scott-Brown, K.C., Tatler, B.W., 2013. Looking for trouble: a description of oculomotor search strategies during live CCTV operation. *Front. Hum. Neurosci.* 7, 615. doi:10.3389/fnhum.2013.00615

Starke, S., Howes, A., Morar, N., Baber, C., 2015. Visual sampling in a road traffic management control room task, in: Sharples, S., Shorrock, S., Waterson, P. (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2015*. Taylor & Francis, Daventry, Northamptonshire, pp. 503–511.

- Stewart, T., 1995. Ergonomics standards concerning human-system interaction. *Appl. Ergon.* 26, 271–274. doi:10.1016/0003-6870(95)00031-7
- Tam, K.Y., 1992. Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design. *Eur. J. Oper. Res.* 63, 322–346. doi:10.1016/0377-2217(92)90034-7
- Titz, J., Scholz, A., Sedlmeier, P., 2018. Comparing eye trackers by correlating their eyemetric data. *Behav. Res. Methods* 50, 1853–1863. <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0954-y>.
- Todi, K., Jokinen, J., Luyten, K., Oulasvirta, A., 2018. Familiarisation: restructuring layouts with visual learning models. In: *Proceedings of the 2018 Conference on Human Information Interaction&Retrieval - IUI 18*. ACM Press, New York, New York, USA, 547–558. <https://doi.org/10.1145/3172944.3172949>.
- Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Tanchoco, J.M.A., 2010. *Facilities Planning*, 4th ed. John Wiley & Sons.
- Tullis, T., Albert, B., 2013. *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics: Second Edition*, *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics: Second Edition*. doi:10.1016/C2011-0-00016-9
- Wickens, C.D., Carswell, C.M., 1995. The Proximity Compatibility Principle: Its Psychological Foundation and Relevance to Display Design. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 37, 473–494. doi:10.1518/001872095779049408
- Wickens, C.D., Helleberg, J., Xu, X., 2002. Pilot maneuver choice and workload in free flight. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 44, 171–88. doi:10.1518/0018720024497943
- Wickens, C.D., Lee, J., Liu, Y.D., Gordon-Becker, S., 2003. *An introduction to human factors engineering*, 2nd editio. ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Wickens C. D., M.J.S., 2008. *Applied attention theory.*, *Ergonomics*. doi:10.1080/00140130802295564
- Wu, C., Liu, Y., 2009. Development and evaluation of an ergonomic software package for predicting multiple-task human performance and mental workload in human-machine interface design and evaluation. *Comput. Ind. Eng.* 56, 323–333. doi:10.1016/j.cie.2008.06.013

Zhu, T., Balakrishnan, J., Cheng, C.H., 2017. Recent advances in dynamic facility layout research. *INFOR Inf. Syst. Oper. Res.* 1–29. doi:10.1080/03155986.2017.1363591

CAPÍTULO VI. - DISCUSIÓN GENERAL y CONCLUSIONES.

6.1. Discusión general de los resultados y conclusiones

En este capítulo se hará una puesta en común de los resultados presentados en los tres capítulos anteriores. Además, se mostrará la contrastación de las conclusiones de esta TD con las de los artículos publicados en revistas científicas.

Esta TD fue centrada en desarrollar aplicaciones de nuevos dispositivos tecnológicos para la evaluación y el diseño ergonómico de puestos de trabajo. Esta investigación se realizó en tres fases.

Inicialmente se enfocó en la identificación de las metodologías de evaluación más empleadas por los profesionales en el área de ergonomía para la detección de factores de riesgo y, dentro de ellas, aquellas en las que el empleo de nuevas tecnologías pueda suponer una mejora en su aplicabilidad y resultados. Una vez identificadas, se abordó el desarrollo e implementación de los procedimientos que permitieran el empleo de las nuevas tecnologías en dichas metodologías de evaluación del riesgo ergonómico para las siguientes dos fases, buscando dar un aporte a la línea de investigación.

El objetivo principal de la primera fase pretendía saber qué aspectos de los métodos de evaluación ergonómica influían más en la utilidad percibida de los mismos. Para ello se trató de medir la correlación entre cinco variables con la Utilidad Percibida de cada método. La primera correspondió al grupo Información/Formación, que contenía problemas relacionados con el entrenamiento, competencia y formación de los profesionales para llevar a cabo cada técnica, así como también con la dificultad para localizar información al respecto. La segunda variable fue el grupo de Coste/Instrumentación, que reunía los problemas expresados por los profesionales relacionados con los requerimientos técnicos observacionales y con el coste de aplicación. La tercera correspondió al grupo Complejidad/Tiempo que reunió los problemas relacionados con la complejidad de aplicación de los métodos y el Tiempo requerido para llevarlos a cabo; la cuarta variable, Adaptabilidad, se refería a la capacidad de los métodos para ser suficientemente flexibles para ser aplicados a un grupo diverso de puestos de trabajo, y que fueran completos y fiables para varios factores de riesgo; el último grupo fue la variable Significancia, la cual recogió los problemas que los profesionales encuentran para interpretar o aprovechar de forma práctica los resultados obtenidos de los métodos observacionales.

En general las respuestas respecto a los métodos observacionales se muestran con buenas valoraciones en utilidad. Solamente fueron valorados por más de un 10% de los encuestados como “poco útil” o “inútil” JSI, G-INSHT, el modelo biomecánico y la ecuación

de levantamiento manual de cargas de NIOSH. Fueron considerados como “útiles” o “muy útiles” por más del 95% de los encuestados OWAS, LEST, REBA y RULA.

El análisis de correlación de la utilidad percibida de los métodos con las 5 variables mostró que es fuerte para Significancia (0,6102), moderada para Adaptabilidad (0,5067), y puede considerarse débil para Coste/Instrumentación (0,3604), Información/Formación (0,3331) y Complejidad/Tiempo (0,2314).

La correlación fue moderada para la variable Adaptabilidad (0,5067), indicando que los profesionales consideraron importante que los métodos observacionales pudieran ser aplicados a una gran diversidad de puestos de trabajo, que sean integrales y confiables para los factores de riesgo, logrando considerar aspectos específicos en los puestos analizados.

En cuanto al grupo de problemas de Información/Formación, más del 50% de los encuestados encontraron algún tipo de carencia en OCRA (59,18%), OCRA Checklist (57,90%), LEST (54,55%) y Tablas de Snook y Ciriello (51,73%). Los métodos mejor valorados en el grupo de problemas Coste/Instrumentos fueron G-INSHT y las Tablas de Snook y Ciriello, siendo mayor a 60% el porcentaje de encuestados que consideraban que su aplicación conlleva costes humanos y materiales bajos respecto a otros métodos. Los métodos en los que se percibió mayor cantidad de problemas del grupo Complejidad/Tiempo fueron OCRA, OCRA Checklist, y el Modelo Biomecánico de Chaffin. Más del 30% de encuestados consideraron estos métodos más complejos y, con respecto al resto de métodos, una pérdida de tiempo. Los métodos más versátiles (adaptabilidad a diversas situaciones) fueron OWAS y LEST. Más del 87% de los encuestados indicaron que podían ser aplicados a varios tipos de puestos de trabajo, y que se adaptaban bien o muy bien a situaciones particulares.

Finalmente, los métodos mejor valorados en cuanto a la Significancia fueron OCRA, RULA, OWAS, REBA y LEST. Más del 90% de los encuestados opinaron que los resultados de estos métodos reflejaron adecuadamente el riesgo presente, y sirvieron de apoyo para determinar la necesidad de intervenir en el puesto.

Los métodos más empleados por los evaluadores fueron RULA (79,51%), ecuación para Levantamiento Manual de Cargas de NIOSH (59,02%), REBA (56,56%) y OWAS (56,97%), mientras que, de los incluidos en el estudio, los métodos menos empleados fueron las Tablas de Snook y Ciriello (11,89%) y el Modelo Biomecánico (13,52%).

Esta primera fase de la investigación logró mostrar la preferencia de los profesionales en la selección de los métodos de evaluación para la detección de factores de riesgo.

Estudios que preceden esta investigación habían mostrado en los resultados mayor preferencia por las metodologías OWAS y RULA. El presente estudio muestra que éstos métodos fueron de preferencia en la práctica habitual de la ergonomía ocupacional, aunque no todos presentan el mismo grado de usabilidad, ni son empleados de la misma forma en la práctica en entornos reales de trabajo. Su correcta selección es un proceso necesario en la toma de decisiones del profesional para la evaluación de un puesto de trabajo.

Los resultados de la primera fase de la investigación muestran que, al juzgar la utilidad de un método de observación, los profesionales otorgan especial importancia a: el apoyo que brindan para tomar decisiones con respecto a los cambios en los sistemas de trabajo, a qué tan aplicables son en los diferentes tipos de trabajos y, si permiten considerar las características específicas de cada puesto de trabajo en los entornos productivos. Su complejidad, la capacitación requerida y el tiempo requerido para su uso parecen tener menos influencia en la utilidad general percibida. Los resultados de este estudio sirven de guía para el desarrollo de nuevas técnicas de evaluación, y para la aplicación de nuevas tecnologías que faciliten la evaluación y mejoren la fiabilidad de los resultados.

En la segunda fase de la investigación se identificaron problemas ergonómicos y sectores productivos en los que fuera de utilidad la introducción de nuevas tecnologías en la valoración y diseño ergonómico. De esta forma, se estableció que la implementación de sensores RGB-D podría ser de utilidad en la optimización del diseño de los espacios de trabajo. Los sensores RGB-D detectan los movimientos de los brazos del trabajador sobre los planos de trabajo, y es empleada esta información para optimizar la configuración de los elementos situados en los mismos empleando un Algoritmo Genético (AG).

El trabajo de campo se desarrolló seleccionando un caso de estudio en un puesto de montaje de pequeños componentes. En la TD se describe este tipo de puestos y los criterios ergonómicos y productivos a considerar para su correcto diseño. Se muestra el empleo del sensor RGB-D para la recogida de los datos y cómo emplearlos en un AG para obtener el diseño óptimo en base a los datos del sensor. Posteriormente se establece el método propuesto aplicado al caso de estudio.

El sistema propuesto emplea un sensor RGB-D para detectar las posiciones de las manos del trabajador mientras realiza su tarea, y un AG obtiene el mejor diseño basándose en los criterios establecidos por el evaluador. Este proceso se desarrolla en tres etapas, las cuales

se implementaron en un software desarrollado para controlar el sistema, compuesto por tres módulos. El primero (módulo de datos) permite introducir información sobre la tarea a analizar (por ejemplo, el número y dimensiones de los elementos de trabajo a distribuir y las dimensiones del área de trabajo). El segundo (módulo de rastreo) controla el sensor RGB-D y almacena la secuencia de movimientos (un sensor RGB-D detecta las posiciones de las manos del trabajador mientras lleva a cabo la tarea). El tercero (módulo de cálculo) implementa el AG para obtener el diseño óptimo (la secuencia de movimientos de las manos es enviada al AG, el cual calcula el mejor diseño del puesto de trabajo).

El resultado del AG ubica todos los ítems en la posición conveniente para facilitar el acceso al trabajador con la mano adecuada, y son respetadas las restricciones geométricas de todos los ítems. Así pues, se minimizan los Costes Geométricos, Posicionales y Fijos de la solución obtenida.

El nivel de desarrollo actual de los sensores RGB-D fue suficiente para automatizar este proceso dado que sólo fue necesaria la captura de las posiciones de los miembros superiores en un área de trabajo limitada, y que fuera posible mantener el sensor en una posición adecuada respecto al trabajador. El sistema presentado combinó los datos obtenidos por el sensor con AGs para la resolución del FLP. De esta forma, el sistema fue capaz de obtener diseños simultáneamente adaptados para varios trabajadores o para varios procesos de producción en el mismo puesto de trabajo. Además, el sistema automáticamente puede proponer nuevos diseños cuando varían los movimientos realizados por los trabajadores. Dado que los algoritmos de rastreo de posturas pueden captar varios trabajadores simultáneamente, el sistema podría adaptarse para el diseño de puestos de trabajo con interacción grupal (Mahoney et al., 2015).

Existe una gran cantidad de criterios ergonómicos que es necesario considerar para el diseño de los espacios en un puesto de trabajo. El sistema propuesto en esta investigación es flexible y permite considerar múltiples criterios en la aplicación de los AG para optimizar el diseño.

En definitiva, esta investigación ha permitido mostrar cómo el empleo de los sensores de profundidad RGB-D para el rediseño de los espacios de trabajo puede mejorar las condiciones ergonómicas de los puestos de trabajo en sistemas de producción.

La tercera fase de la TD empleó un sistema de rastreo ocular para obtener diseños óptimos de los elementos de una interfaz. El método se enfocó en optimizar el diseño de las interfaces basadas en software. Entre éstas se contemplaron los paneles de control o aplicaciones con menús personalizables y barras de herramientas. La propuesta utilizó el

rastreo ocular y el rastreo del ratón como técnicas no invasivas que permitieron recoger los datos requeridos por un AG para obtener nuevos diseños de los elementos de la interfaz, mientras los operarios llevaban a cabo sus tareas habituales en las PVDs.

Se realizó el trabajo de campo organizando dos grupos (A y B) de 10 operarios cada uno. En una primera sesión experimental los operarios de ambos grupos completaron una secuencia de 20 tareas en un panel de control. En una segunda sesión experimental, se les solicitó a los miembros del grupo A manualmente reorganizar el diseño de la interfaz, considerando sus experiencias en la primera sesión, y desarrollar la misma secuencia de tareas. Los miembros del grupo B utilizaron el mejor diseño obtenido por el algoritmo. Fueron recogidos el tiempo para completar la tarea, los errores cometidos, los datos del rastreo ocular y los eventos del ratón para todos los usuarios, y todos a su vez completaron un cuestionario ASQ para medir el nivel de satisfacción con cada interface.

Las interfaces fueron optimizadas por el algoritmo con base en la interacción histórica con los operarios mientras estaban siendo utilizadas. El sistema desarrollado pudo proponer nuevas configuraciones optimizadas de forma automatizada, basadas en los datos recolectados permanentemente en los usuarios durante el funcionamiento normal del panel de control. Teniendo en cuenta técnicas que precedían este estudio (Gajos et al., 2006b; Gamecho et al., 2015; Nichols et al., 2006; Nichols and Laau, 2008), fue posible obtener interfaces personalizadas por tarea empleando los datos recolectados, mientras los operarios estaban desempeñando tareas específicas (Gajos et al., 2006a).

Las tasas de error, los tiempos de finalización de tareas y las puntuaciones ASQ obtenidas para cada grupo en la sesión 2, sugirieron que el diseño del panel de control obtenido empleando el método propuesto en este trabajo (grupo B), incrementó la efectividad, la eficiencia y la satisfacción del usuario, comparado con diseños definidos por los propios usuarios (grupo A).

El experimento desarrollado en este trabajo ha demostrado que el AG utilizado en el sistema propuesto es capaz de encontrar soluciones que consideran las restricciones geométricas de los elementos de la interfaz. Dado que todas las restricciones geométricas se cumplen, la solución encontrada no tiene Coste Geométrico, y el Coste Total se debe entonces al Coste Relacional. Así pues, el diseño optimizado obtenido puede ser directamente implementado sin necesidad de ajustes manuales.

Después de finalizar las fases de experimentación en el desarrollo de esta TD, se ha logrado concluir que, el empleo de nuevas tecnologías en la evaluación y el rediseño de puestos de trabajo, permite una intervención efectiva que logra una mejor interacción del trabajador

con el puesto de trabajo. Estas herramientas (RGB-D y rastreo ocular) se enfocaron en mejorar los sistemas ergonómicos optimizando el diseño de los puestos de trabajo. Se logra así la disminución de los factores de riesgo de TMEs a los cuales podían estar expuestos los trabajadores durante la jornada laboral.

*CAPÍTULO VII. – CONTRASTE DE HIPÓTESIS, APORTACIONES DE LA TD Y
LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACION.*

7.1. Contraste de hipótesis, aportaciones y líneas futuras

En este capítulo se presenta el cumplimiento de los objetivos planteados, así como la contrastación de las hipótesis con las aportaciones más relevantes del trabajo, y se proponen varias líneas futuras de investigación en la aplicación de tecnologías orientadas al ser humano en entornos laborales.

7.1.1. Validación de las hipótesis y cumplimiento de objetivos

- Primera hipótesis: son varios los métodos de evaluación ergonómica empleados en la práctica habitual de la ergonomía ocupacional. Un gran número ha sido científicamente validado para identificar factores de riesgo ergonómico. Sin embargo, no todos presentan el mismo grado de usabilidad ni son empleados en la misma medida en la práctica real en entornos de trabajo.

Esta hipótesis quedó contrastada al alcanzar el primer objetivo de esta tesis. Se logró verificar que los métodos observacionales de evaluación ya validados por la literatura científica son ampliamente empleados por expertos para la evaluación ergonómica de puestos de trabajo a nivel mundial. Este estudio ha analizado datos recibidos de 244 usuarios de diferentes países tales como: España (21,31%), Chile (11,07%), Colombia (10,25%), México (9,84%), Venezuela (8,61%), Argentina (8,61%), Perú (6,56%), Estados Unidos (4,92%), Ecuador (4,51%), Guatemala (3,28%), Costa Rica (2,05%) y otros países (8,61%). Los resultados nos muestran que los métodos más empleados fueron RULA (79,51%), Ecuación para el Levantamiento Manual de Cargas de NIOSH (59,02%), REBA (56,56%) y OWAS (56,97%), mientras que las Tablas de Snook y Ciriello (11,89%) y el Modelo Biomecánico (13,52%) fueron los métodos menos empleados de los incluidos en el estudio. En los resultados de este estudio se evidencia que los profesionales dan menos importancia a la complejidad de los métodos que a las capacidades de adaptarse a entornos reales en el momento valorar la utilidad, apreciando que sean aplicables en diferentes tipos de entornos laborales permitiendo contemplar características particulares de cada puesto de trabajo.

- Segunda hipótesis: se podría disminuir el nivel de los factores de riesgo ergonómico de la tarea desarrollada con el uso de las nuevas tecnologías orientadas al ser humano para el rediseño de los puestos de trabajo en diferentes sectores industriales.

Esta hipótesis fue validada en la segunda y tercera publicación de esta TD, en las que se evidencia la consecución del segundo objetivo con la identificación de las tecnologías orientadas al ser humano aplicables en el ámbito laboral para el rastreo y evaluación de la

actividad humana desde el punto de vista de la ergonomía. En el desarrollo de esta investigación se aplicaron dos dispositivos tecnológicos al diseño ergonómico de puestos de trabajo. Se emplearon sensores RGB-D en un puesto de trabajo de montaje en una empresa juguetera logrando disminuir los factores de riesgo de desarrollo de TMEs en la parte superior del cuerpo, derivados de posturas y movimientos repetitivos con predominio en los miembros superiores por los requerimientos de la tarea. En el tercer estudio de esta TD, se empleó la tecnología de rastreo ocular, considerando además el rastreo del ratón y los AGs para mejorar el diseño de la configuración en un puesto de trabajo con PVDs, logrando una importante mejora en la eficiencia en el desempeño de la tarea y una disminución en el número de errores cometidos.

- Tercera hipótesis: el empleo de los sensores de profundidad (RGB-D) para el rediseño de los espacios de trabajo puede mejorar las condiciones ergonómicas en los puestos de trabajo para diferentes sistemas de producción.

Esta hipótesis se validó en el segundo estudio de esta TD. En él se logra emplear un sensor RGB-D como dispositivo de adquisición de datos posturales usados posteriormente por AGs para optimizar el diseño de puestos de trabajo, mostrando que los resultados obtenidos en esta aplicación permiten mejorar los procesos optimizando los tiempos y movimientos en puestos dedicados al ensamblaje de piezas de tamaño pequeño/mediano en diferentes sectores productivos.

- Cuarta hipótesis: El empleo de Eye-Tracking (Rastreo Ocular) permite obtener configuraciones de PVDs que aumenten la eficiencia y la seguridad para el trabajador.

El uso del rastreo ocular en puestos de trabajo con PVDs en el tercer estudio de esta TD ha logrado una importante mejora en la eficiencia en el desempeño de la tarea y una disminución en el número de errores cometidos. Los resultados en la tercera investigación muestran que los diseños obtenidos, empleados con este método, permiten que las configuraciones de las interfaces definidas por el usuario tengan un excelente rendimiento en cuanto a efectividad, eficiencia y satisfacción del usuario, lo que valida la cuarta hipótesis.

7.1.2 Aportaciones realizadas

Las aportaciones que se han realizado con esta TD son:

- Se han identificado los métodos de evaluación más utilizados en la actualidad a nivel internacional y la priorización que mostraban los profesionales según la experiencia de usabilidad, fiabilidad y efectividad en diferentes sectores productivos.
- Se han implementado tecnologías orientadas al ser humano en los puestos de trabajo que permitan mejorar las condiciones laborales de los mismos y la disminución de los TMEs.
- El empleo de sensores RGB-D y AGs han permitido generar distribuciones de los puestos de trabajo que simplifican el proceso de ensamble de las piezas, logrando así disminuir los tiempos y movimientos de los miembros superiores en el trabajador. El sistema desarrollado puede generar diseños adaptados para diferentes procesos de producción en puestos de trabajo donde se fabrican diferentes productos o calcular diseños óptimos para varios trabajadores que ocupan el mismo puesto en diferentes turnos.
- El empleo de sensores de Eye-Tracking y AGs ha permitido generar distribuciones de los elementos de paneles de control e interfaces software auto-adaptados a la actividad desarrollada, que permiten disminuir la tasa de errores cometidos e incrementar la eficiencia en el desarrollo de la tarea y la satisfacción del usuario.
- Se han desarrollado dos softwares, uno para la optimización de estaciones de trabajo empleando sensores RGB-D y otro para optimizar la configuración de interfaces empleando Eye-Tracking (rastreo ocular).
- Se ha desarrollado un AG que permite la distribución de espacios en zonas de trabajo o interfaces que optimiza el layout (diseño) mientras respeta las restricciones geométricas de los ítems distribuidos.

7.1.3. Líneas futuras de investigación

Finalmente, se plantean varios caminos por los que se puede seguir investigando en relación a los contenidos de esta TD:

- Investigar el empleo de sensores RGB-D en otros sectores productivos para mejorar la configuración de los puestos de trabajo logrando una mejora de las condiciones ergonómica de los mismos.
- Emplear los sensores RGB-D en sus versiones nuevas y mejoradas para el diseño de los puestos de trabajos.
- Desarrollar tecnologías nuevas orientadas al ser humano útiles para mejorar las condiciones de trabajo.
- Estudiar la aplicabilidad de wearables para mejorar las condiciones de trabajo, analizando posturas, ritmo cardiaco, respuesta galvánica de la piel, etc.
- Desarrollar estudios de la aplicabilidad de la realidad virtual y realidad aumentada para disminuir los desordenes musculo esqueléticos derivados de la actividad laboral.

En definitiva, el rediseño de los puestos de trabajo y la configuración según las exigencias de las tareas son un campo con vacíos por explorar. Las líneas futuras posibles de investigación son numerosas y altamente interesantes. La presente TD, ha contribuido en el uso de tecnologías orientadas al ser humano en la mejora de puestos de trabajo desde una perspectiva ergonómica, y espera abrir puertas a investigaciones futuras que ayuden a desarrollar y promover este importante campo de estudio.

CAPÍTULO VIII. - REFERENCIAS

Se listan a continuación las referencias usadas en el documento, por orden alfabético.

- Amaral, A.R.S., 2006. On the exact solution of a facility layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* 173, 508–518. doi:10.1016/j.ejor.2004.12.021
- Asteriadis, S., Chatzitofis, A., Zarpalas, D., Alexiadis, D.S., Daras, P., 2013. Estimating human motion from multiple Kinect sensors, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision / Computer Graphics Collaboration Techniques and Applications - MIRAGE '13*. p. 1. doi:10.1145/2466715.2466727
- Alluisi, E.A., Morgan, B.B., 1976. Engineering Psychology and Human Performance. *Annu. Rev. Psychol.* 27, 305–330. doi:10.1146/annurev.ps.27.020176.001513
- Alppay, C., Bayazit, N., 2015. An ergonomics based design research method for the arrangement of helicopter flight instrument panels. *Appl. Ergon.* 51, 85–101. doi:10.1016/j.apergo.2015.04.011
- Battini, D., Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., 2011. New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. *Int. J. Ind. Ergon.* 41, 30–42. doi:10.1016/j.ergon.2010.12.001
- Beek, A. van der, Frings-Dresen, M., 1998. Assessment of mechanical exposure in ergonomic epidemiology. *Occup. Environ. Med.* 55, 291–299.
- Bentley, T., Tappin, D., 2010. Incorporating organizational safety culture within ergonomics practice. *Ergonomics* 53 (10), PP.1167-1174
- Berger, K., Meister, S., Nair, R., Kondermann, D., 2013. A State Of the Art Report on Research in Multiple RGB-D sensor Setups, in: Grzegorzec, M., Theobalt, C., Koch, R., Kolb, A. (Eds.), *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, pp. 257–272. doi:10.1007/978-3-642-44964-2_12
- Best, R., Begg, R., 2006. Overview of movement analysis and gait features. *Libr. en Google Play Comput. Intell. Mov. Sci. neutral networks other Emerg. Tech.* 1–69. doi:10.4018/978-1-59140-836-9
- Bonnechère, B., Jansen, B., Salvia, P., Bouzahouene, H., Omelina, L., Moiseev, F., Sholukha, V., Cornelis, J., Rooze, M., Jan, S.V.S., 2013. Validity and reliability of the Kinect within functional assessment activities: Comparison with standard stereophotogrammetry. *Gait Posture*. doi:10.1016/j.gaitpost.2013.09.018
- Bonnechère, B., Sholukha, V., Moiseev, F., Rooze, M., S, V.S.J., 2013. From Kinect™ to anatomically-correct motion modelling: Preliminary results for human application., in:

Schouten, B., Fedtke, S., Bekker, T., Schijven, M., Gekker, A. (Eds.), Games for Health: Proceedings of the 3rd European Conference on Gaming and Playful Interaction in Health Care. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 15–24. doi:10.1007/978-3-658-02897-8

Brace, I., 2013. Questionnaire design: how to plan, structure, and write survey material for effective market research, 3rd ed. London

Brodie, M.A., Walmsley, A., Page, W., 2008. The static accuracy and calibration of inertial measurement units for 3D orientation. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.* 11, 641–8. doi:10.1080/10255840802326736

Buckle, P., Li, G., 1996. User needs in exposure assessment for musculoskeletal risk assessment, in: Proceedings of 1st International Cyberspace Conference on Ergonomics “Cyberg.”

Cammarota, A., 2007. “The European commission initiative on WRMSDs: recent developments,” in EUROFOUND conference on “Musculoskeletal disorders,”

Carvalho, P.V.R., dos Santos, I.L., Gomes, J.O., Borges, M.R.S., Guerlain, S., 2008. Human factors approach for evaluation and redesign of human-system interfaces of a nuclear power plant simulator. *Displays* 29, 273–284. doi:10.1016/j.displa.2007.08.010

Chaffin, D.B., 1969. A computerized biomechanical model: development of and use in studying gross body actions. *J. Biomech.* 2, 429–441.

Chapanis, A., 1996. Human factors in systems engineering. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.

Colombini, D., Occhipinti, E., Cairolì, S., Barracco, A., 2000. Proposal and preliminary validation of a check-list for the assessment of occupational exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Med. Del Lav.* 102, 1–39.

Clark, R. a, Pua, Y.-H., Fortin, K., Ritchie, C., Webster, K.E., Denehy, L., Bryant, A.L., 2012. Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control. *Gait Posture* 36, 372–7. doi:10.1016/j.gaitpost.2012.03.033

Clark, R.A., Bower, K.J., Mentiplay, B.F., Paterson, K., Pua, Y.H., 2013. Concurrent validity of the Microsoft Kinect for assessment of spatiotemporal gait variables. *J. Biomech.* 46, 2722–2725. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.08.011

Cox, A.L., Silva, M.M., 2006. The Role of Mouse Movements in Interactive Search. *Proc. Cogn. Sci. Soc.* 28.

Das, B., Behara, D.N., 1995. Determination of the normal horizontal working area: a new

model and method. *Ergonomics* 38, 734–748. doi:10.1080/00140139508925145

Das, B., Sengupta, A.K., 1996. Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach. *Appl. Ergon.* 27, 157–163. doi:10.1016/0003-6870(96)00008-7

David, G., Woods, V., Li, G., Buckle, P., 2008. The development of the Quick Exposure Check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Appl. Ergon.* 39, 57–69.

David, G.C., 2005. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occup. Med. (Lond)*. 55, 190–9.

Dempsey, P.G., McGorry, R.W., Maynard, W.S., 2005. A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists. *Appl. Ergon.* 36, 489–503.

Deros, B.M., Khamis, N.K., Ismail, A.R., Jamaluddin, H., Adam, A.M., Rosli, S., 2011. An Ergonomics study on assembly line workstation design. *Am. J. Appl. Sci.* 8, 1195–1201. doi:10.3844/ajassp.2011.1195.1201

Destelle, F., Ahmadi, A., O'Connor, N.E., Moran, K., Chatzitofis, A., Zarpalas, D., Daras, P., 2014. Low-cost accurate skeleton tracking based on fusion of kinect and wearable inertial sensors, in: *European Signal Processing Conference*. pp. 371–375.

Diego-Mas, J.A., Alcaide-Marzal, J., 2014. Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work. *Appl. Ergon.* 45, 976–85. doi:10.1016/j.apergo.2013.12.001

Diego-Mas, J.A., Santamarina-Siurana, M.C., Cloquell-Ballester, V.A., Alcaide-Marzal, J., 2008. Slicing tree's geometric potential: an indicator for layout problems based on slicing tree structure. *Int. J. Prod. Res.* 46, 1071–1087. doi:10.1080/00207540600932061

Diego-Mas, J.A., Santamarina-Siurana, M.C., Alcaide-Marzal, J., Cloquell-Ballester, V.A., 2009. Solving facility layout problems with strict geometric constraints using a two-phase genetic algorithm. *Int. J. Prod. Res.* 47, 1679–1693. doi:http://dx.doi.org/10.1080/00207540701666253

Diego-Mas, J. A., Asensio-Cuesta, S., Sanchez-Romero, M. A., and Artacho-Ramirez, M. A., 2009. "A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 39, no. 1, pp. 23–33

Diego-Mas, J. A, Poveda-Bautista, R., and Garzon-Leal, D.-C., Oct. 2015. "Influences on the use of observational methods by practitioners when identifying risk factors in physical work," *Ergonomics*, vol. 58, no. 10, pp. 1660–1670,

- Degani, A., Palmer, E.A., Bauersfeld, K.G., 1992. "Soft" Controls for hard displays: still a challenge. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 36, 52–56. doi:10.1177/154193129203600114
- Drira, A., Pierreval, H., Hajri-Gabouj, S., 2007. Facility layout problems: A survey. *Annu. Rev. Control* 31, 255–267. doi:10.1016/j.arcontrol.2007.04.001
- Dutta, T., 2012. Evaluation of the Kinect™ sensor for 3-D kinematic measurement in the workplace. *Appl. Ergon.* 43, 645–9. doi:10.1016/j.apergo.2011.09.011
- Dul, J., Bruder, R., Buckle, P., Carayon, P., Falzon, P., Marras, W.S., Wilson, J.R., van der Doelen, B., A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession *Ergonomics*, 55 (4) (2012), pp. 377-395
- Dyckhoff, H., 1990. A typology of cutting and packing problems. *Eur. J. Oper. Res.* 44, 145–159. doi:10.1016/0377-2217(90)90350-K
- El-Baz, M.A., 2004. A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments. *Comput. Ind. Eng.* 47, 233–246. doi:10.1016/j.cie.2004.07.001
- Farrington-Darby, T., Picku, L., Wilson, J., 2005. Safety culture in railway maintenance. *Safety Science* 43, 39-60
- Foley, J.D., Kim, W.C., Kovacevic, S., Murray, K., 1991. UIDE - An intelligent user interface design environment, in: *Architectures for Intelligent Interfaces: Elements and Prototypes*. pp. 339–384. doi:10.1145/107215.128716
- Francis, G., 2000. Designing Multifunction Displays: An Optimization Approach. *Int. J. Cogn. Ergon.* 4, 107–124. doi:10.1207/S15327566IJCE0402_2
- Frøkjær, E., Hertzum, M., Hornbæk, K., 2000. Measuring Usability: Are Effectiveness, Efficiency, and Satisfaction Really Correlated? *ACM CHI 2000 Conf. Hum. Factors Comput. Syst.* 2, 345–352. doi:10.1145/332040.332455
- Fernández-Baena, A., Susín, A., Lligadas, X., 2012. Biomechanical validation of upper-body and lower-body joint movements of kinect motion capture data for rehabilitation treatments, in: *Proceedings of the 2012 4th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, INCoS 2012*. pp. 656–661. doi:10.1109/iNCoS.2012.66
- Ferrer F, Minaya G, Niño J, Ruiz M. *Manual de ergonomía*. 2.a ed. Madrid: Fundación Mapfre; 1997

- Genaidy, A.M., Al-Shedi, A.A., Karwowski, W., 1994. Postural stress analysis in industry. *Appl. Ergon.* 25, 77–87.
- Government of Ontario (Canada), 2011. Occupational Health and Safety Act. Retrieved May 21, 2014 from http://www.e-aws.gov.on.ca/html/statutes/english/elaws_statutes_90o01_e.htm.
- Guelaud, F., Beauchesne, M.N., Gautrat, J., Roustang, G., 1977. Pour une analyse des conditions du travail ouvrier dans l'entreprise. *Laboratoire d'économie et de sociologie du travail, C.N.R.S., Aix-en-Provence.*
- Garcia, J., Zalevsky, Z., 2007. Range Mapping Using Speckle Decorrelation. Google Patents. US 20070216894 A1.
- Geiselhart, F., Otto, M., Rukzio, E., 2016. On the Use of Multi-Depth-Camera Based Motion Tracking Systems in Production Planning Environments. *Procedia CIRP* 41, 759–764. doi:10.1016/j.procir.2015.12.088
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, Boston, MA.
- Gómez-Conesa A, Méndez F., 2000. Ergonomía en las actividades de vida diaria en la infancia. *Fisioterapia*; 22:130-42)
- Haggag, H., Hossny, M., Nahavandi, S., Creighton, D., 2013. Real time ergonomic assessment for assembly operations using kinect, in: *Proceedings - UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim 2013.* pp. 495–500. doi:10.1109/UKSim.2013.105
- Geman, S., Geman, D., 1984. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-6*, 721–741. doi:10.1109/TPAMI.1984.4767596
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, Boston, MA.
- Goldberg, J.H., Kotval, X.P., 1999. Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *Int. J. Ind. Ergon.* 24, 631–645. doi:10.1016/S0169-8141(98)00068-7
- Gwizdka, J., Spence, I., 2007. What Can Searching Behavior Tell Us About the Difficulty of Information Tasks? A Study of Web Navigation. *Proc. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 43, 1–22. doi:10.1002/meet.14504301167

- Han, J., Shao, L., Xu, D., Shotton, J., 2013. Enhanced computer vision with Microsoft Kinect sensor: A review. *IEEE Trans. Cybern.* 43, 1318–1334. doi:10.1109/TCYB.2013.2265378
- Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., Chen, H., 2007. Ant colony optimization for solving an industrial layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* 183, 633–642. doi:10.1016/j.ejor.2006.10.032
- Harris, R.L., Glover, B.L., Spady, A.A., 1986. Analytic techniques of pilot scanning behavior and their application. (NASA Tech. Rep. No. 2525). Hampton, VA.
- Hasan, M. S., Yu. H., Innovative developments in HCI and future trends. In *Proceedings of the 21st International Conference on Automation & Computing, ICAC, Glasgow, UK*, pp. 84–89, 2015.
- Hasegawa, M., Ikeguchi, T., Aihara, K., Itoh, K., 2002. A novel chaotic search for quadratic assignment problems. *Eur. J. Oper. Res.* 139, 543–556. doi:10.1016/S0377-2217(01)00189-8
- Helleberg, J.R., Wickens, C.D., 2003. Effects of data-link modality and display redundancy on pilot performance: An attentional perspective. *Int. J. Aviat. Psychol.* 13, 189–210. doi:10.1207/S15327108IJAP1303_01
- Health and Safety Executive, 2013. *Managing for Health and Safety (HSG65)*, third ed. HSE Books, London
- Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X., Fox, D., 2012. RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. *Int. J. Rob. Res.* 31, 647–663. doi:10.1177/0278364911434148
- Hessels, R.S., Kemner, C., van den Boomen, C., Hooge, I.T.C., 2016. The area-of-interest problem in eyetracking research: A noise-robust solution for face and sparse stimuli. *Behav. Res. Methods* 48, 1694–1712. doi:10.3758/s13428-015-0676-y
- Hignett, S., McAtamney, L., 2000. Rapid entire body assessment (REBA). *Appl. Ergon.* 31, 201–5.
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press. Ann Arbor.
- Holman, G.T., Carnahan, B.J., Bulfin, R.L., 2003. Using linear programming to optimize control panel design from an ergonomics perspective. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 47, 1317–1321. doi:10.1177/154193120304701047

- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., van de Weijer, J., 2011. Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. Oxford University Press, Oxford.
- Horberry, T.J., Burgess-Limerick, R., Steiner, L.J., 2010. Controls and displays, in: Human Factors for the Design, Operation, and Maintenance of Mining Equipment. pp. 119–144. doi:doi:10.1201/9781439802335-c8
- Hosseini-Nasab, H., Emami, L., 2013. A hybrid particle swarm optimisation for dynamic facility layout problem. *Int. J. Prod. Res.* 51, 4325–4335. doi:10.1080/00207543.2013.774486
- Huang, J., White, R.W., Dumais, S., 2011. No clicks, no problem: Using cursor movements to understand and improve search. *Proc. 29th SIGCHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst.* 1225. doi:10.1145/1978942.1979125
- Hwang, S.L., Liang, S.F.M., Liu, T.Y.Y., Yang, Y.J., Chen, P.Y., Chuang, C.F., 2009. Evaluation of human factors in interface design in main control rooms. *Nucl. Eng. Des.* 239, 3069–3075. doi:10.1016/j.nucengdes.2009.09.006
- INSHT, 1998. Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la manipulación manual de cargas. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo de España, Madrid.
- International Organization for Standardization, 1998. ISO 9241-11: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - part 11: guidance on usability. *Int. Organ. Stand.* 1998, 28. doi:10.1038/sj.mp.4001776
- International Organization for Standardization, 2008. Ergonomic design of control centres — Part 5: Displays and controls.
- Islir, A.A., 1998. A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design. *Int. J. Prod. Res.* 36, 1549–1569. doi:10.1080/002075498193165
- IEA Technical Information Human Factors and Sustainable Development, 2010; Available from: <http://www.iea.cc/> (accessed 30.10.13.)
- James, T., Rego, C., Glover, F., 2009. Multistart tabu search and diversification strategies for the quadratic assignment problem. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans* 39, 579–596. doi:10.1109/TSMCA.2009.2014556
- Jefatura del Estado Español, 2003. Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco

normativo de la prevención de riesgos laborales. Boletín Of. del Estado 298, 44408–44415.

Jain, P.K., Sharma, P.K., 2005. Solving Job Shop Layout Problem Using Ant Colony Optimization Technique, in: 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. pp. 288–292. doi:10.1109/ICSMC.2005.1571160

James, T., Rego, C., Glover, F., 2009. Multistart tabu search and diversification strategies for the quadratic assignment problem. IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans 39, 579–596. doi:10.1109/TSMCA.2009.2014556

Karhu, O., Kansi, P., Kourinka, I., 1977. Correcting working postures in industry: a practical method for analysis. Appl. Ergon. 8, 199–201.

Karn, K. S. , Ellis, S., Juliano C., 1999. Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring, in: CHI '99 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. p. 173. doi:10.1145/632716.632823

Kantowitz, B.H., Sorkin, R.D., 1983. Human factors: understanding people-system relationships. Wiley, New York.

Kim, J., 2006. Task difficulty as a predictor and indicator of web searching interaction. Proc. ACM CHI 2006 Conf. Hum. Factors Comput. Syst. 2, 959–964. doi:10.1145/1125451.1125636

Kim, W.C., Foley, J.D., 1990. DON: user interface presentation design assistant, in: UIST. Third Annual Symposium on User Interface Software and Technology. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium, Snowbird, Utah, USA, October 3--5, 1990. pp. 10–20. doi:10.1145/97924.97926

Khoshelham, K., Elberink, S., 2012. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications. Sensors 12, 1437–1454. doi:10.3390/s120201437

Kroemer, K.H.E., Kroemer, H.B., Kroemer-Elbert, K.E., 2001. Ergonomics: How to design for ease and efficiency. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Kitchenham, B., Pfleeger, S.L., 2003. Principles of survey research part 6. ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes 28, 24.

Kusiak, A., Heragu, S.S., 1987. The facility layout problem. Eur. J. Oper. Res. doi:10.1016/0377-2217(87)90238-4

Küçükoğlu, İ., Öztürk, N., 2017. Two-stage optimisation method for material flow and allocation management in cross-docking networks. Int. J. Prod. Res. 55, 410–429.

doi:10.1080/00207543.2016.1184346

Kulturel-Konak, S., Konak, A., 2015. A large-scale hybrid simulated annealing algorithm for cyclic facility layout problems. *Eng. Optim.* 47, 963–978. doi:10.1080/0305215X.2014.933825

Kusiak, A., Heragu, S.S., 1987. The facility layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* doi:10.1016/0377-2217(87)90238-4

Leider, P. C., Boschman, J. S., Frings-Dresen, M., van der Molen, H. F., 2015. When is job rotation perceived useful and easy to use to prevent work-related musculoskeletal complaints? *Appl. Ergon.* 51, 205-210

Lewis, J.R., 1995. IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 7, 57–78. doi:10.1080/10447319509526110

Lin, C.-J., Wu, C., 2010. Improved link analysis method for user interface design – modified link table and optimisation-based algorithm. *Behav. Inf. Technol.* 29, 199–216. doi:10.1080/01449290903233892

Liu, J., Gwizdka, J., Liu, C., Belkin, N.J., 2010. Predicting task difficulty for different task types. *Proc. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.* 47, 1–10. doi:10.1002/meet.14504701173

Li, G., Buckle, P., 1999. Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. *Ergonomics* 42, 674–695.

Malchaire, J., 2011. A classification of methods for assessing and / or preventing the risks of musculoskeletal disorders. European Trade Union Institute.

Martin, C., Cegarra, J., Averty, P., 2011. Analysis of Mental Workload during En-route Air Traffic Control Task Execution Based on Eye-Tracking Technique. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 592–597. doi:10.1007/978-3-642-21741-8_63

Martínez-González M, Gómez-Conesa A., 2001. Ergonomía en educación secundaria. *Fisioterapia*;23:29-38.

Mahoney, J.M., Kurczewski, N.A., Froede, E.W., 2015. Design method for multi-user workstations utilizing anthropometry and preference data. *Appl. Ergon.* 46, 60–66. doi:10.1016/j.apergo.2014.07.003

Merz, P., Freisleben, B., 1999. A comparison of memetic algorithms, tabu search, and ant

colonies for the quadratic assignment problem. Proc. 1999 Congr. Evol. Comput. Cat No 99TH8406 3, 2063–2070. doi:10.1109/CEC.1999.785529

Merz, P., Freisleben, B., 1999. A comparison of memetic algorithms, tabu search, and ant colonies for the quadratic assignment problem. Proc. 1999 Congr. Evol. Comput. Cat No 99TH8406 3, 2063–2070. doi:10.1109/CEC.1999.785529

McAtamney, L., Corlett, E.N., 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Appl. Ergon. 24, 91–9.

Moore, J.S., Garg, A., 1995. The Strain Index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 56, 443–458.

Mocková, D., & Rybicková, A. (2014). APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO VEHICLE ROUTING PROBLEM. Neural Network World, 24(1), 57-78. Retrieved from <http://ezproxy.unbosque.edu.co:2048/login?url=https://search-proquest-com.ezproxy.unbosque.edu.co/docview/1509802266?accountid=41311>

Morris Brenna, Federica Foadelli, and Michela Longo, “Application of Genetic Algorithms for Driverless Subway Train Energy Optimization,” International Journal of Vehicular Technology, vol. 2016, Article ID 8073523, 14 pages, 2016. doi:10.1155/2016/8073523

McKendall, A.R., Liu, W.-H., 2012. New Tabu search heuristics for the dynamic facility layout problem. Int. J. Prod. Res. 50, 867–878. doi:10.1080/00207543.2010.545446

Mueller, F., Lockerd, A., 2001. Cheese: tracking mouse movement activity on websites, a tool for user modeling. CHI'01 Ext. Abstr. Hum. factors ... 279–280. doi:10.1145/634067.634233

Nixon, M.E., Howard, A.M., Chen, Y.P., 2013. Quantitative evaluation of the Microsoft Kinect™ for use in an upper extremity virtual rehabilitation environment, in: 2013 International Conference on Virtual Rehabilitation, ICVR 2013. pp. 222–228. doi:10.1109/ICVR.2013.6662131

NUI, 2013. Natural User Interface for Kinect for Windows [WWW Document]. Microsoft Dev. Netw. URL <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh855352.aspx>

Nachreiner, F., Nickel, P., Meyer, I., 2006. Human factors in process control systems: The design of human-machine interfaces, in: Safety Science. pp. 5–26. doi:10.1016/j.ssci.2005.09.003

Obdržálek, S., Kurillo, G., Ofli, F., Bajcsy, R., Seto, E., Jimison, H., Pavel, M., 2012. Accuracy

and robustness of Kinect pose estimation in the context of coaching of elderly population. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2012, 1188–93. doi:10.1109/EMBC.2012.6346149

Occhipinti, E., 1998. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41, 1290–1311.

Occupational Outlook Handbook [WWW Document], 2015. . Bur. Labor Stat. U.S. Dep. Labor. URL <http://www.bls.gov/ooh/production/assemblers-and-fabricators.htm> (accessed 5.30.16).

OHSCO, 2008. Musculoskeletal disorders prevention series. Part 3C: MSD prevention toolbox - More on in-depth risk assessment methods [WWW Document]. *Occup. Heal. Saf. Counc. Ontario*. URL http://www.iwh.on.ca/system/files/documents/msd_prevention_toolbox_3c_2007.pdf (accessed 5.25.14).

Önüt, S., Tuzkaya, U.R., Doğaç, B., 2008. A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem. *Comput. Ind. Eng.* 54, 783–799. doi:10.1016/j.cie.2007.10.012.

Pascual, S. a, Naqvi, S., 2008. An investigation of ergonomics analysis tools used in industry in the identification of work-related musculoskeletal disorders. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 14, 237–45.

Patrizi, A., Pennestrì, E., Valentini, P.P., 2015. Comparison between low-cost marker-less and high-end marker-based motion capture systems for the computer-aided assessment of working ergonomics. *Ergonomics* 1–11. doi:10.1080/00140139.2015.1057238

Pernice, K., Nielsen, J., Usability, E., Using, S., 2009. *Eyetracking Methodology: How to Conduct and Evaluate Usability Studies Using Eyetracking*. Notes 1–17.

Pfister, A., West, A.M., Bronner, S., Noah, J.A., 2014. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis. *J. Med. Eng. Technol.* 38, 274–80. doi:10.3109/03091902.2014.909540

Plantard, P., Auvinet, E., Pierres, A.-S. Le, Multon, F., 2015. Pose estimation with a Kinect for ergonomic studies: evaluation of the accuracy using a virtual mannequin. *Sensors (Basel)*. 15, 1785–803. doi:10.3390/s150101785

Raeisi, S., Osqueizadeh, R., Maghsoudipour, M., Jafarpisheh, A.S., 2016. Ergonomic redesign of an industrial control panel. *Int. J. Occup. Environ. Med.*

Savage, S.J., Waldman, D.M., 2008. Learning and fatigue during choice experiments: a

comparison of online and mail survey modes. *J. Appl. Econ.* 23, 351–371.

Saifullah Hussin, M., Stützle, T., 2014. Tabu search vs. simulated annealing as a function of the size of quadratic assignment problem instances. *Comput. Oper. Res.* 43, 286–291. doi:10.1016/j.cor.2013.10.007

Sanders, M.S., McCormick, E.J., 1993. *Human factors in engineering and design*, New York: McGraw-Hill .

Santos, J., Sarriegi, J.M., Serrano, N., Torres, J.M., 2007. Using ergonomic software in non-repetitive manufacturing processes: A case study. *Int. J. Ind. Ergon.* 37, 267–275. doi:10.1016/j.ergon.2006.10.022

Saptari, A., Lai, W.S., Salleh, M.R., 2011. Jig design, assembly line design and work station design and their effect to productivity. *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* 5, 9–16.

Sarbolandi, H., Lefloch, D., Kolb, A., 2015. Kinect range sensing: Structured-light versus Time-of-Flight Kinect. *Comput. Vis. Image Underst.* 139, 1–20. doi:10.1016/j.cviu.2015.05.006

Schelvis, R. M., Oude Hengel, K. M., Burdorf, A., Blatter, B. M., Strijk, J. E., van der Beek, A. J., 2015. Evaluation of occupational health interventions using a randomized controlled trial: challenges and alternative research designs. *Scand. J. Work Environ. Health* 41, 491e503

Shikdar, A.A., Al-Hadhrami, M., 2007. Smart workstation design: An ergonomics and methods engineering approach. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 2, 363–374. doi:10.1504/IJISE.2007.013184

Shikdar, A.A., Al-Hadhrami, M., 2012. Evaluation of a low-cost ergonomically designed adjustable assembly workstation. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 10, 153–166. doi:10.1504/IJISE.2012.045178

Shikdar, A.A., Al-Kindi, M.A., 2007. Office ergonomics: deficiencies in computer workstation design. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 13, 215–223. doi:10.1080/10803548.2007.11076722

Shinde, G. V., Jadhav, V.S., 2012. “Ergonomic analysis of an assembly workstation to identify time consuming and fatigue causing factors using application of motion study.” *Int. J. Eng. Technol.* 4, 220–227

Siegel, S., Castellan, N.J., 1988. *Nonparametric statistics for the behavioral sciences* (2nd ed.), Nonparametric statistics for the behavioral sciences (2nd ed.).

Srinivas, M., Patnaik, L.M., 1994. *Genetic algorithms: a survey*. Computer (Long Beach, Calif). 27. doi:10.1109/2.294849

- Snook, S.H., Ciriello, V.M., 1991. The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. *Ergonomics* 34, 1197–1213.
- Spector, J.T., Lieblich, M., Bao, S., McQuade, K., Hughes, M., 2014. Automation of workplace lifting hazard assessment for musculoskeletal injury prevention. *Ann. Occup. Environ. Med.* 26, 15. doi:10.1186/2052-4374-26-15
- Srinivas, M., Patnaik, L.M., 1994. Genetic algorithms: a survey. *Computer (Long Beach, Calif)*. 27. doi:10.1109/2.294849
- Stainer, M. J., Scott-Brown, K. C., Tatler, B. W., 2013. Looking for trouble: a description of oculomotor search strategies during live CCTV operation. *Front. Hum. Neurosci.* 7, 615. doi:10.3389/fnhum.2013.00615
- Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K. Salas, E., 2004. Hendrick, H., *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Starke, S., Howes, A., Morar, N., Baber, C., 2015. Visual sampling in a road traffic management control room task, in: Sharples, S., Shorrock, S., Waterson, P. (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors 2015*. Taylor & Francis, Daventry, Northamptonshire, pp. 503–511
- Stewart, T., 1995. Ergonomics standards concerning human-system interaction. *Appl. Ergon.* 26, 271–274. doi:10.1016/0003-6870(95)00031-7
- Tam, K.Y., 1992. Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design. *Eur. J. Oper. Res.* 63, 322–346. doi:10.1016/0377-2217(92)90034-7
- Tappin, D., Bentley, T., Ashby, L., 2015. An implementation evaluation of a qualitative culture assessment tool. *Appl. Ergon.* 47 (1), 84-92
- Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Tanchoco, J.M.A., 2010. *Facilities Planning*, 4th ed. John Wiley & Sons.
- Trask, C., Mathiassen, S., 2012. Data collection costs in industrial environments for three occupational posture exposure assessment methods. *BMC Med. Res. Methodol.* 12, 89.
- Takala, E. P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G.-Å., Mathiassen, S. E., Neumann, W. P., Sjøgaard, G., Veiersted, K. B., Westgaard, R. H., and Winkel, J., Jan. 2010. “Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work,” *Scand. J. Work. Environ. Health*, vol. 36, no. 1, pp. 3–24
- Tullis, T., Albert, B., 2013. *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and*

Presenting Usability Metrics: Second Edition, Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics: Second Edition. doi:10.1016/C2011-0-00016-9

University of Surrey, 2003. Assessing musculoskeletal disorders at work: which tools to use when? [WWW Document]. Guildford. URL http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/1999/crr99251.pdf (accessed 6.6.14).

V. Putz-Anderson, B. Bernard, and S. Burt, 1997. "Musculoskeletal disorders and workplace factors," ... -Related Musculoskelet. ..., vol. 97–141, no. July 1997, pp. 1–1 – 7–11

Waters, T.R., Putz-Anderson, V., Garg, A., Fine, L.J., 1993. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics* 36, 749–776.

Wells, R., Norman, R., Neumann, P., Andrews, D., 1997. Assessment of physical work load in epidemiologic studies: common measurement metrics for exposure assessment. *Ergonomics* 37, 979–88.

Wickens, C.D., Carswell, C.M., 1995. The Proximity Compatibility Principle: Its Psychological Foundation and Relevance to Display Design. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 37, 473–494. doi:10.1518/001872095779049408

Wickens, C.D., Helleberg, J., Xu, X., 2002. Pilot maneuver choice and workload in free flight. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 44, 171–88. doi:10.1518/0018720024497943

Wickens, C.D., Lee, J., Liu, Y.D., Gordon-Becker, S., 2003. An introduction to human factors engineering, 2nd editio. ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.

Wickens C. D., M.J.S., 2008. Applied attention theory., *Ergonomics*. doi:10.1080/00140130802295564

Wilson, J.R., **Fundamentals of systems ergonomics/human factors;** *Appl. Ergon.*, 45 (1) (2014), pp. 5-13

Wu, C., Liu, Y., 2009. Development and evaluation of an ergonomic software package for predicting multiple-task human performance and mental workload in human-machine interface design and evaluation. *Comput. Ind. Eng.* 56, 323–333. doi:10.1016/j.cie.2008.06.013

Xu, X., McGorry, R.W., 2015. The validity of the first and second generation Microsoft Kinect for identifying joint center locations during static postures. *Appl. Ergon.* 49, 47–54. doi:10.1016/j.apergo.2015.01.005

- Yang, L., Zhang, L., Dong, H., Alelaiwi, A., Saddik, A., 2015. Evaluating and improving the depth accuracy of Kinect for Windows v2. *IEEE Sens. J.* 15, 4275–4285. doi:10.1109/JSEN.2015.2416651
- Zha, X.F., 2003. Soft computing framework for intelligent human-machine system design, simulation and optimization. *Soft Comput. - A Fusion Found. Methodol. Appl.* 7, 184–198. doi:10.1007/s00500-002-0196-4
- Zha, X.F., Lim, S.Y.E., 2003. Intelligent design and planning of manual assembly workstations: A neuro-fuzzy approach. *Comput. Ind. Eng.* 44, 611–632. doi:10.1016/S0360-8352(02)00238-3
- Zhang, L., Sturm, J., Cremers, D., Lee, D., 2012. Real-time human motion tracking using multiple depth cameras, in: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on.* IEEE, pp. 2389–2395. doi:10.1109/IROS.2012.6385968
- Zhu, T., Balakrishnan, J., Cheng, C.H., 2017. Recent advances in dynamic facility layout research. *INFOR Inf. Syst. Oper. Res.* 1–29. doi:10.1080/03155986.2017.1363591
- zj, L. Ribeiro, D., 2012. "Cost–benefit analysis of a socio-technical intervention in a Brazilian footwear company", *Appl. Ergon.*, vol. 43, no. 5, pp. 948–957

ANEXOS

9.1. Anexo I - Encuesta artículo I

Introducción

Muchas gracias por su colaboración. Como usted ha sido previamente informado, los resultados de esta encuesta serán tratados de una forma absolutamente confidencial. En ningún caso se asociarán los resultados que se hagan públicos a personas o empresas específicas.

Emplee el tiempo que considere necesario para completar la encuesta. Ésta consta de dos partes. En la primera parte se le solicitará información sobre usted y sobre los métodos de evaluación ergonómica que emplea generalmente en su trabajo. En la segunda parte de la encuesta se le pedirá información sobre su experiencia con el empleo de los métodos seleccionados.

Al finalizar ambas partes de la encuesta los datos serán automáticamente enviados a un servidor. Recuerde que debe completar las dos partes en una misma sesión.

Agradecemos su colaboración.

Primera parte

¿Cuál es su edad?

Menos de 25 años Entre 26 y 35 años Entre 36 y 45 años Más de 45 años

Usted es...

Hombre Mujer

¿Tiene usted una titulación o certificación que le habilita de forma oficial y según las leyes de su estado para desarrollar las tareas que desempeña en su empresa en el área de la ergonomía y la prevención de riesgos laborales?

Sí No

¿Considera usted que ha recibido la suficiente formación sobre evaluación de riesgos ergonómicos como para realizar esta tarea de forma adecuada?

Sí No

¿Cuánto tiempo lleva usted realizando evaluaciones de riesgos ergonómicos?

- o Menos de 3 años
- o Entre 3 años y menos de 6 años
- o Entre 6 años y menos de 9 años
- o Entre 9 años y 12 años
- o Más de 12 años

¿Cuáles de los siguientes métodos de evaluación utiliza generalmente en su trabajo? Por favor, seleccione aquellos que ha empleado al menos 3 veces para evaluar un puesto de trabajo en su empresa.

- o Ecuación para el Levantamiento Manual de Cargas de NIOSH
- o JSI (Evaluación de la Repetitividad de Movimientos)
- o REBA (Valoración Rápida del Cuerpo Completo)
- o OWAS (Sistema de Evaluación de Postura Laboral de Owako)
- o LEST (Método del Laboratorio de Economía y Sociología del Trabajo)
- o Tablas Snook and Ciriello
- o OCRA (Evaluación del Riesgo Asociado al Trabajo Repetitivo)
- o OCRA Checklist
- o BiomechEEC (Modelo Biomecánico de Chaffin)
- o GINSHT (Guía para el Levantamiento de Carga del INSHT)

Segunda parte

Respecto al método REBA: 1

(A) Aproximadamente ¿con qué frecuencia emplea en su trabajo el método REBA?

- o Una vez al año o menos
- o Cada 6 meses o Cada 3 meses
- o Una vez al mes o Más de una vez al mes

(B) ¿Considera usted que su formación es suficiente para aplicar adecuadamente el método REBA y que la información de la que dispone sobre el método es suficiente y fácilmente accesible?

- o Sí, conozco suficientemente el método o dispongo de toda la información necesaria y ésta es fácilmente accesible
- o Sería necesario tener algo más de formación o que la información necesaria fuera más accesible
- o No, necesitaría mucha más formación e información

¹ La segunda parte de la encuesta se repitió para cada uno de los métodos seleccionados por el encuestado en la primera parte. En este caso se emplea como ejemplo el método REBA.

(C) Comparado con otros métodos, ¿cree que la aplicación del método REBA supone pocos costes para su empresa debido a que su aplicación requiere pocos medios humanos (personal) y materiales (instrumentación)?

- Sí, la aplicación de este método conlleva costes humanos y materiales muy bajos respecto a otros métodos
- Considero que los costes derivados de aplicar este método están aproximadamente en la media de los costes de aplicar cualquier otro método
- No, la aplicación de este método supone elevados costes humanos y/o materiales con respecto a otros métodos

(D) Comparado con otros métodos, y respecto al tiempo requerido para aplicar el método y la complejidad de aplicación, usted considera que el método REBA...

- Es especialmente simple y necesita mucho menos tiempo que otros métodos
- Es algo más simple y necesita algo menos de tiempo que otros métodos
- La complejidad y el tiempo requerido está más o menos en la media de este tipo de otros métodos
- Es algo más complejo y necesita algo más de tiempo que otros métodos
- Es especialmente complejo y necesita mucho más tiempo que otros métodos

(E) ¿Cree que el método REBA puede ser aplicado a varios tipos de puestos y que permite contemplar las situaciones particulares de cada puesto?

- Sí, el método es aplicable a muchos tipos puestos de trabajo y se adapta bien a casi todas las situaciones particulares
- Puede aplicarse a bastantes tipos puestos de trabajo y se adapta bien a algunas situaciones particulares
- Puede aplicarse solo a algún tipo de puestos y solo en algunos casos el método se adapta a situaciones muy habituales
- No, el método es muy rígido. Muy pocos puestos reúnen las condiciones para ser evaluados con él y no contempla situaciones particulares muy habituales.

(F) En su opinión, ¿cree que los resultados obtenidos al aplicar el método REBA reflejan el nivel de riesgo del puesto, que resultan útiles para determinar la necesidad de una intervención y que sirven de guía para solventar los problemas detectados?

- Sí, los resultados siempre reflejan claramente el riesgo presente en puesto y la necesidad de adoptar medidas.
- En general los resultados reflejan el riesgo presente en puesto y la necesidad de adoptar medidas

- En ocasiones los resultados no reflejan el riesgo presente en el puesto o no sirven para determinar si es necesario intervenir
- No, los resultados casi nunca reflejan el riesgo presente en el puesto y no sirven para determinar si es necesario intervenir.

(G) Considerando globalmente las características del método REBA, la forma en que usted lo utiliza, y los beneficios que se obtienen de su empleo, usted cree que, de forma general, el método es...:

- Muy útil
- Bastante útil
- Poco útil
- Inútil

9.2. Anexo II – Tablas del artículo III

Resultados de las sesiones experimentales.

GRUPO	USUARIO	Duración (s)		Errores		ASQ		Clicks del Ratón		Longitud Trayectoria del Ratón	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
A	U1	542,14	370,44	7	6	4,00	4,00	332	300	127546	82343
A	U2	560,43	377,60	5	6	3,67	4,00	346	315	124469	84769
A	U3	471,08	378,61	3	3	2,67	3,00	267	301	105581	86024
A	U4	497,84	371,08	7	5	3,67	3,00	336	278	104843	79863
A	U5	465,96	372,28	4	3	3,33	3,67	365	388	110071	11716 2
A	U6	386,34	279,66	6	4	3,33	3,00	257	228	69834	58079
A	U7	622,45	326,41	7	6	4,67	4,00	350	305	184256	54653
A	U8	617,82	498,54	9	8	5,67	5,33	354	308	167325	87956
A	U9	463,77	428,94	10	7	4,00	4,33	369	262	118588	10933 3
A	U10	622,66	445,15	6	5	3,67	4,00	322	311	130716	77826
B	U11	555,94	301,74	9	6	4,00	3,67	255	226	97222	75854
B	U12	548,85	304,14	5	4	4,33	4,00	290	251	150469	62385
B	U13	566,96	382,64	3	1	3,33	3,00	279	259	85659	47890
B	U14	558,67	352,61	3	2	3,00	3,00	335	275	100197	69994
B	U15	537,46	377,84	11	7	6,00	5,00	401	340	103251	55489
B	U16	309,68	272,24	8	6	4,00	3,67	220	215	86557	83408
B	U17	747,14	382,42	8	5	6,00	4,00	374	252	149917	93349
B	U18	681,74	359,04	10	6	5,00	4,33	256	238	100040	58339
B	U19	412,02	296,47	7	4	3,00	3,33	266	227	128072	73192
B	U20	436,49	306,96	5	4	4,33	3,00	328	251	119357	56075

Tabla A 1. Resultados de las sesiones experimentales. Se muestran por usuario, para ambas sesiones experimentales (S1 y S2): duración de la tarea (segundos), errores cometidos, puntuación del Cuestionario Post Escenario (ASQ), número de clicks del ratón y longitud de la trayectoria del ratón (en pixeles).

	Indicador	Sesión 1		Sesión 2		Prueba t	%M
		M	SD	M	SD		
Todos los participantes	Duración (s)	530,27	103,67	359,24	57,24	8,54**	-32,25
	Errores	6,65	2,43	4,90	1,77	6,05**	-26,32
	ASQ	4,08	0,97	3,77	0,68	2,27**	-7,60
	Clicks del ratón	315,10	49,97	276,50	44,21	4,62**	-12,25
	Longitud trayectoria del Ratón	118198,54	28402,00	75699,13	18445,20	5,94**	-35,96
Grupo A	Duración (s)	525,05	81,18	384,87	61,13	6,22**	-26,70
	Errores	6,40	2,12	5,30	1,64	3,16**	-17,19
	ASQ	3,87	0,82	3,83	0,72	0,26	-1,03
	Clicks del ratón	329,80	38,56	299,60	41,22	2,38**	-9,16
	Longitud trayectoria del Ratón	124322,96	32366,30	83800,79	19300,40	3,21**	-32,59
Grupo B	Duración (s)	535,50	126,64	333,61	41,49	6,47**	-37,70
	Errores	6,90	2,81	4,50	1,90	6,47**	-34,78
	ASQ	4,30	1,09	3,70	0,66	2,78**	-13,95
	Clicks del ratón	300,40	57,49	253,40	35,23	4,32**	-15,65
	Longitud trayectoria del Ratón	112074,12	23917,50	67597,47	14138,10	5,96**	-32,25

**p<0,05. M = Media. SD = Desviación Típica. %M = Variación porcentual media entre sesiones.

Tabla A 2. Media y desviación típica de los valores en los indicadores por grupo y sesión, y valores t para las pruebas t con muestras dependientes entre las sesiones realizadas.

	Indicador	Grupo A		Grupo B		Prueba t	%M
		M	SD	M	SD		
Sesión 1	Duración (s)	525,05	81,18	535,50	126,64	-0,22	-1,99
	Errores	6,40	2,12	6,90	2,81	-0,45	-7,81
	ASQ	3,87	0,82	4,30	1,09	-0,99	-11,11
	Clicks del ratón	329,80	38,56	300,40	57,49	1,34	8,91
	Longitud trayectoria del Ratón	124322,96	32366,30	112074,12	23917,50	0,96	9,85
Sesión 2	Duración (s)	384,87	61,13	333,61	41,49	2,19**	13,32
	Errores	5,30	1,64	4,50	1,90	1,01	15,09
	ASQ	3,83	0,72	3,70	0,66	0,43	3,39
	Clicks del ratón	299,60	41,22	253,40	35,23	2,69**	15,42
	Longitud trayectoria del Ratón	83800,79	19300,40	67597,47	14138,10	2,14**	19,34

**p<0,05. M = Media. SD = Desviación Típica. %M = Variación porcentual media entre grupos.

Tabla A 3. Media y desviación típica de los valores en los indicadores por sesión y grupo, y valores t para las pruebas t con muestras independientes realizadas entre grupos.