

Hacia una ergonomía inteligente. Guía práctica del Método Forces basado en captura de movimiento

Javier Marín Boné y **José J. Marín Zurdo**

IDERGO (Investigación y Desarrollo en Ergonomía), I3A (Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón), Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza

Las evaluaciones ergonómicas de puestos de trabajo son especialmente beneficiosas para llevar a cabo acciones preventivas, especialmente en entornos de producción en los que hay tareas repetitivas y la carga postural es alta.

Asimismo, el contexto actual demuestra que los métodos ergonómicos tradicionales deben complementarse con métodos ergonómicos inteligentes que consideren las posibilidades que aporta la tecnología.

Este artículo detalla los fundamentos del método ergonómico Forces para su aplicación práctica e interpretación [1]. Forces está diseñado para aplicarse mediante tecnología de captura de movimiento y permite calcular los riesgos en cada articulación, tanto para cada postura, como para el conjunto del puesto de trabajo evaluado. El cálculo se basa en la medición postural cinemática y una estimación cinética de todas las fuerzas y esfuerzos de torsión que soportan las articulaciones durante el movimiento. La aplicación de este método por el personal técnico de prevención ayuda a reducir trastornos musculoesqueléticos causados por tareas repetitivas y a disminuir las pérdidas sociales, económicas y de productividad que estos trastornos conllevan¹.

¹ Este artículo es un resumen práctico del artículo *Forces: A Motion Capture-Based Ergonomic Method for the Today's World*, publicado en la revista *Sensors* [1].

INTRODUCCIÓN

Los trastornos musculoesqueléticos (TME) son el problema de salud laboral más común, afectando aproximadamente a tres de cada cinco personas trabajadoras [2]. Estas lesiones son especialmente prevalentes en entornos de producción en los que se repiten tareas durante la jornada laboral y donde la carga postural es alta [3]. De hecho, los TME generan elevados costes para las empresas y tienen importantes repercusiones en la calidad de vida.

En este sentido, las evaluaciones ergonómicas de puestos de trabajo son beneficiosas para identificar los problemas ergonómicos que suponen riesgo para la salud. Esta información sobre el riesgo es esencial para tomar mejores medidas correctoras [4-6], hasta el punto de que, en muchos países, las normativas exigen su realización [7].

Para realizar las evaluaciones ergonómicas en entornos industriales se aplican diferentes métodos o índices observacionales que estiman el riesgo de aparición de TME. Entre los más utilizados encontramos el método *Occupational Repetitive Action* (OCRA) (citado en la ISO 11228-3) [8], para el trabajo repetitivo; la ecuación del *The National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) (citada en la ISO 11228-1) [9], para la manipulación manual de cargas; el método incluido en la norma ISO 11226 u otros, como el *Rapid Entire Body Assessment* (REBA) [10,11], el *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA) [12], o el *Ovako Working Analysis System* (OWAS) [13], para la evaluación de la carga postural; y por último, para fines más generales, métodos como la *European Assembly Worksheet* (EAWS) [14] o el *Postural Ergonomic Risk Assessment* (PERA) [15].

Estos métodos observacionales son útiles en entornos industriales porque no requieren demasiada instrumentación, normalmente solo una cámara y una plantilla predefinida para tomar notas a mano. Esta facilidad de uso y su presencia en las principales normativas nacionales y europeas, ha conducido a considerarlos métodos de referencia en la comunidad preventiva [16].

No obstante, hay que considerar que la base observacional de estos métodos les confiere una carga significativa de subjetividad. El análisis de los movimientos suele basarse en la observación del puesto de trabajo a simple vista o en la visualización de vídeos [17]. Por otra parte, requieren un elevado tiempo de aplicación, especialmente cuando las evaluaciones ergonómicas deben realizarse en fábricas con muchos puestos de trabajo [18]. En ocasiones, se acumula tanto retraso en las evaluaciones ergonómicas que las correcciones y modificaciones del puesto de trabajo propuestas llegan al área de producción cuando ya no son necesarias porque las condiciones de producción han cambiado. Adicionalmente, la gestión de la información resultante de las evaluaciones suele analizarse de forma no automatizada, lo que dificulta al personal técnico de prevención centrarse en lo realmente importante: tomar decisiones para mejorar la salud del personal a su cargo [18].

Todo ello, unido al contexto actual de la Industria 4.0 [19] y de los dispositivos inteligentes interconectados en el internet de las cosas [20,21], pone de manifiesto la necesidad de complementar estos métodos observacionales con nuevas técnicas basadas en tecnología [22,23]. Si bien estos métodos resultan de utilidad, y su aplicación es necesaria, se deberían dirigir los esfuerzos hacia una ergonomía 4.0 e inteligente [24,27].

Por ello, para hacer frente a estas limitaciones, ya desde hace años se promueven técnicas de medición directa y objetiva en los puestos de trabajo productivos [22,23]. Tecnologías como la captura de movimiento [18,28] pueden integrarse en la metodología ergonómica para lograr una evaluación objetiva de las posturas de la persona trabajadora. Existen estudios como los de Caputo et al. [28], Peppoloni et al. [29], Vignals et al. [30] o softwares comerciales, como *ViveLab Ergo* [31], *NAWO Live* [32] o *ScaleFit* [33] que aplican métodos observacionales con este tipo de tecnología, de manera que simplifican y automatizan la observación postural.

No obstante, además de la tecnología, es esencial considerar el método de análisis de la información. Es necesario disponer de métodos ergonómicos concebidos desde su origen teniendo en cuenta la tecnología en la que se basan. La tecnología proporciona información precisa y objetiva que debería beneficiar y a la vez sustentar el análisis y la automatización de todo el proceso de evaluación. De hecho, más allá de automatizar la observación de las posturas, la tecnología es capaz de objetivar otros factores ergonómicos, como los esfuerzos o aceleraciones que se producen en el cuerpo.

Para abordar los retos descritos, Marín y Marín [1] describieron y validaron estructuralmente el método ergonómico *Forces*, el cual fue diseñado teniendo en cuenta las posibilidades que ofrece la captura de movimiento para su aplicación en entornos industriales. Este método se basa en la tesis doctoral de Boné [34], en la que se establecieron las bases conceptuales del mismo. *Forces* utiliza la medición postural cinemática con captura de movimiento, así como una estimación cinética de todas las fuerzas y esfuerzos de torsión que soportan las articulaciones derivadas del movimiento

y de las fuerzas externas ejercidas, de ahí su nombre.

En este artículo se detallan los fundamentos del método Forces para su aplicación práctica e interpretación, quedando fuera del alcance sus fundamentos teóricos y validez estructural que fueron abordados por Marín y Marín [1]. Asimismo, se discuten las características del método relacionadas con su aplicabilidad y utilidad para la evaluación ergonómica de puestos de trabajo de tareas repetitivas en el contexto de la industria 4.0 y la ergonomía inteligente.

EL MÉTODO FORCES

El método Forces estima el riesgo de sufrir TME en la columna lumbar, columna cervical, hombros, codos, muñecas y rodillas en puestos de trabajo caracterizados por ciclos de fabricación y tareas repetitivas.

Requisitos previos

Para la aplicación de Forces se requiere el uso de un sistema de captura de movimiento y un *software* de análisis. Debido al alto volumen de información necesario para el análisis, el método requiere implementarse en una aplicación informática. En este sentido, cabe destacar que el método Forces no está ligado a un sistema de captura o *software* de análisis específico o comercial. Sus fundamentos y bases teóricas a nivel de *software* son de libre acceso y pueden consultarse en el estudio de Marín y Marín [1].

Aplicación del método

La aplicación de Forces implica la captura de movimiento de una persona trabajadora mientras realiza las tareas durante el ciclo de trabajo (fase de captura). Tras ello, el personal

técnico debe introducir en el sistema cierta información concreta y objetiva (fase de procesado) y, con ello, la aplicación informática realiza un cálculo postura a postura basado en la cinemática y cinética del movimiento, para obtener el riesgo de sufrir TME (fase de interpretación y análisis de las causas). Posteriormente, es posible realizar simulaciones y cambios en los parámetros para estudiar el impacto de posibles acciones de mejora sobre los riesgos resultantes en el puesto de trabajo (fase de simulación).

Parámetros

En la tabla 1 se presentan los parámetros que debe conocer y gestionar el personal técnico evaluador. Por una parte, los parámetros que se deben introducir en el sistema (datos de entrada) y, por otra, aquellos datos resultantes (datos de salida), necesarios para la interpretación del riesgo y toma de decisiones.

Sistema de captura de movimiento

El sistema de captura permite registrar el movimiento de la persona trabajadora designada durante la ejecución de las tareas a evaluar y trasladarlo a un modelo humano o avatar [36]. Forces no está restringido a la utilización de un sistema de captura de movimiento específico o comercial. No obstante, a nivel práctico se recomienda utilizar equipos que permitan la medición en el propio entorno real de trabajo y sin requerir un tiempo de preparación elevado (ver ejemplo en figura 1). Adicionalmente, es necesario que, de manera sincronizada con la captura de movimiento, se tome vídeo en vivo de los movimientos. Las cámaras no son necesarias para capturar el movimiento, pero ofrecen información visual adicional que es de interés para la evaluación.

Cinemática y cinética

Para la aplicación de Forces, el procesado automático de los datos debe proveer la información cinemática y cinética del movimiento. La información cinemática se obtiene directamente de la captura de movimiento y se refiere a la rotación, el desplazamiento, la velocidad angular y la aceleración angular de cada articulación y en cada instante de la captura. Marín et al. [36] describieron cómo calcular la cinemática completa con un sistema de captura basado en sensores inerciales o *inertial measurement units* (IMU), en inglés.

La información cinética requiere realizar una estimación a partir de los datos de la captura y se refiere al módulo y dirección de los vectores de fuerza y de torsión de cada articulación, y en cada instante de la captura. Huston [35] expone las ecuaciones y tablas antropométricas para realizar la estimación cinética.

Cabe destacar que, para el cálculo cinético, más allá de la información relacionada con el modelo humano (longitud, peso y distribución de masa de cada segmento corporal), es necesario determinar las condiciones externas o de contorno, es decir, los puntos de apoyo del cuerpo en cada instante. Como expone Marín et al. [36], dichos apoyos pueden determinarse de forma automatizada por parte del sistema.

Adicionalmente, como indica la tabla 1, también se deben conocer las fuerzas y las torsiones externas que se perciben en las manos para realizar las acciones necesarias durante el ciclo de trabajo. Para introducir dichos esfuerzos externos, Marín y Marín [1], muestran el formulario ejemplo de la figura 2a. En este formulario, cada fila representa una acción que se realiza y, en cada una de ellas, el personal evaluador debe introducir el fotograma de inicio y fin

Tabla 1 ■ **Parámetros de entrada y salida del método Forces**

Parámetro	Descripción	Fase
Datos de entrada		
Altura	Altura de la persona trabajadora evaluada. Es posible que el sistema de captura elegido requiera medidas antropométricas adicionales.	Captura
Peso	Peso de la persona trabajadora evaluada. Si se pretende obtener el riesgo para el puesto de trabajo, se recomienda utilizar el peso asociado a la altura que proporcionan las tablas antropométricas; por ejemplo, las tablas de Huston [35]. Si se pretende estimar el riesgo para una persona concreta, entonces se debe utilizar su peso.	Captura
Fuerzas y torsiones	Fuerzas y esfuerzos de torsión percibidos en las manos. Se deben introducir a través de un formulario interactivo indicando: el rango de fotogramas, la dirección y el tipo de agarre.	Procesado
Tipo de agarre	Mango, gancho, pinza o palmar.	Procesado
Tiempo de captura	Rango de fotogramas de la captura que se considera a efectos de aplicación del método.	Procesado
Tiempo de ciclo	Tiempo en segundos concedido por parte del área de producción para realizar el ciclo de trabajo.	Procesado
Horas sin recuperar	Numero entero de horas en las que no se recupera. Según la NTP-916 , una hora sin recuperación se considera aquella en la que se descansa menos de 10 min. La última hora de la jornada se considera siempre recuperada.	Procesado
Micro-pausas	Factor de reducción del riesgo que depende del número de segundos de descanso por cada ciclo de fabricación, según la NTP-629 .	Procesado
Tiempo de trabajo	Tiempo en horas de la jornada laboral con actividad física.	Procesado
Factores adicionales	Porcentaje establecido a criterio del evaluador para considerar la presencia de factores de riesgo no medidos por el sistema de captura. Se consideran los factores citados por la norma ISO 11228-3, como vibración, condiciones ambientales adversas o precisión requerida en la colocación de piezas. Valor de 0-30 % presencia mínima, 31-60 % presencia moderada y 61-100 % presencia crítica de factores.	Procesado
Preparación del personal	Factor que considera la condición física de la persona que realiza las tareas. Se elige 0,9 para personal sensible, 1,0 para personal medio, 1,1 para personal entrenado y 1,2 para personal especialmente entrenado. Se recomienda un valor de 1,0, a menos que el servicio de prevención pretenda determinar si los riesgos siguen siendo aceptables para el personal sensible, o bien un valor superior si se acredita un nivel de preparación determinado.	Procesado
Datos de salida		
Riesgo por postura	Riesgo postura a postura para cada articulación en función de la cinemática y la cinética. Permite identificar los instantes con más riesgo.	Interpretación
Riesgo por minuto	Riesgo sobre cada articulación que resume el riesgo del puesto de trabajo. Se obtiene mediante la suma ponderada del riesgo de todas las posturas y en cada articulación.	Interpretación

Figura 1 Ejemplo de captura de movimiento en puesto de trabajo [1]



de la acción; si la acción es ejercida con una o ambas manos; cuando proceda, el vector de fuerza o torsión; y, finalmente, el tipo de agarre. Para facilitar la introducción de los vectores de fuerza y par, proponen los criterios que se ilustran en la figura 2b.

Proceso de cálculo del riesgo

Una vez calculada la cinemática, la estimación de la cinética y considerando los datos de entrada de la tabla 1, la aplicación debe integrar las ecuaciones descritas por Marín y Marín [1] para el cálculo del porcentaje de riesgo, el cual representa la carga ergonómica respecto a la carga máxima obtenida por experimentación [1].

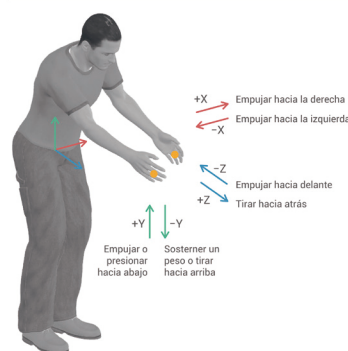
En primer lugar, se calcula el riesgo biomecánico por postura (*RiskPerPosture*), que representa riesgo postura a postura para cada articulación en función de la cinemática y la cinética. El *RiskPerPosture* depende de ciertos factores, que es relevante conocer, denominados *AngleScore*, *AngularAccelerationScore*, *ForceScore*, *TorqueScore* y *GripScore*; los cuales pueden tomar un valor comprendido entre 1 y N, siendo N un valor distinto para cada factor de acuerdo con su peso en el cómputo general. Dichos factores dependen de la rotación de la articulación para el *AngleScore*, comprendido entre 1 y 2; de la aceleración angular para el *AngularAccelerationScore*, comprendido entre 1 y 1,5; del módulo de la fuerza para el *ForceScore*, comprendido entre 1 y 2; del módulo de la torsión para obtener el *TorqueScore*, comprendido entre 1 y 2,5; y del agarre seleccionado para obtener el *GripScore*, comprendido entre 1 y 2, y que solo afecta a la articulación de la muñeca.

Tras calcular el *RiskPerPosture* para cada postura y articulación, se puede trazar un gráfico como el de la figura 3, que representa el riesgo de las articulaciones a

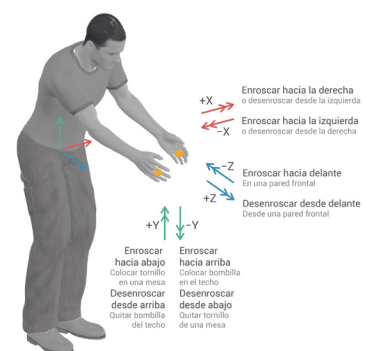
Figura 2 a) Formulario ejemplo para introducir acciones realizadas por el personal. (b) Criterios y ejemplos de interpretación de los vectores de fuerza y torsión [1]

Fr.Ini	Fr.End	R/L/Both	Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz	Grasp type	
1	29	518	0-Right	0	-1.5	0.0	0	0	0	1.Appropriate wrap
2	698	1284	0-Right	0	0	0	0	0	0	6.Pinch
3	1285	1394	0-Right	0	-0.6	0	0	0.0	-0.4	2.Not prepared wrap
4	1637	1775	2-Both	0	0	-3.6	0	0	0	8.Appropriate palmar
5	1892	2092	1-Left	-2.1	0	0	0	0	0	1.Appropriate wrap
6	0	0	0-Right	0	0	0	0	0	0	0.Not specified
7	0	0	0-Right	0	0	0	0	0	0	0.Not specified
8	0	0	0-Right	0	0	0	0	0	0	0.Not specified

Fuerzas percibidas al

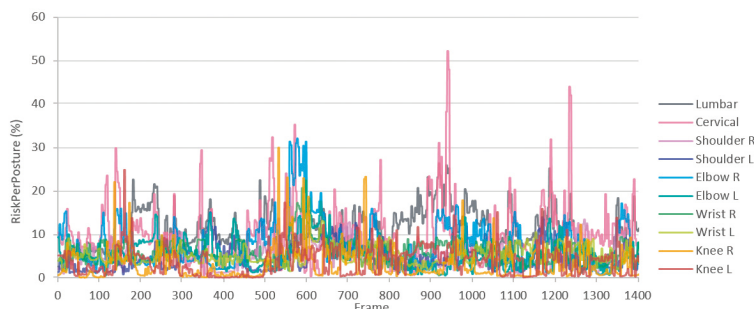


Esfuerzos de torsión percibidos al



Eje X Eje Y Eje Z Puntos de aplicación Regla de la mano derecha para las torsiones Enroscar = Sentido horario

■ Figura 3 ■ Ejemplo de gráfica *RiskPerPosture* [1]



R: lado derecho

L: lado izquierdo

■ Tabla 2 ■ Puntuación final e interpretación del riesgo [1]

<i>RiskPerMinute</i> (%)	Nivel de riesgo (<i>RiskLevel</i>)	Evaluación (<i>Valuation</i>)	Interpretación
≤10	≤1	Sin riesgo	Aceptable
>10 ≤ 15	>1 ≤ 2	Riesgo bajo	
>15 ≤ 25	>2 ≤ 3	Riesgo medio	
>25 ≤ 40	>3 ≤ 4	Riesgo alto	Condicional
>40 ≤ 70	>4 ≤ 5	Riesgo muy alto	Inaceptable
>70	>5	Riesgo severo	

lo largo de la captura y permite identificar aquellas posturas en las que los riesgos son elevados, esencial para profundizar en las razones o causas de los resultados.

Posteriormente, a través de las ecuaciones descritas por Marín y Marín [1] se calcula una suma ponderada del riesgo de todas las posturas y se obtiene un valor para cada articulación que resume el riesgo del puesto correspondiente al ciclo de trabajo; este valor se conoce como riesgo total por minuto (*RiskPerMinute*). Para realizar esta suma, se introducen en las ecuaciones factores relativos al contexto, que dependen de los datos introducidos, descritos en la tabla 1. Concretamente el *CycleTime* (tiempo de ciclo de tabla 1), el *RepetitivenessFactor* y los *GeneralFactors*. Dentro de los *GeneralFactors*

tenemos el *RecoveryFactor*, *MicroPausesFactor* (micro-pausas de la tabla 1), el *DurationFactor* y el *AdditionalFactor* (factores adicionales de la tabla 1).

En la tabla 2 se muestran los niveles de riesgo para cada articulación. De esta forma, el *RiskPerMinute* se representa como un semáforo, verde para valores entre 0 y 25 %, amarillo para valores entre 25 y 40 % y rojo para valores superiores al 40 %.

Un riesgo verde implica un riesgo aceptable. Un riesgo amarillo implica un riesgo tolerable condicional, con el cual se pueden realizar las tareas con seguridad, pero es necesario vigilar la correcta ejecución y la educación postural, ya que cambios en las condiciones de trabajo

podrían incrementar los riesgos. Un riesgo rojo implica la necesidad de adoptar medidas para minimizar riesgos. Dichas medidas pueden ser organizativas, de rediseño del puesto, de metodología de ejecución, de educación postural o de otra índole.

DISCUSIÓN

En este artículo se ha presentado los fundamentos del método ergonómico Forces para su aplicación e interpretación. Este método está diseñado para evaluar el riesgo de TME en puestos de trabajo de tareas repetitivas. Se trata de un método de evaluación ergonómica de medición directa diseñado para ser aplicado *in situ* con un sistema portátil de captura de movimiento. La evaluación del riesgo se basa en la estimación de los esfuerzos en las articulaciones resultantes de las posturas, velocidades y aceleraciones del movimiento capturado, así como de los esfuerzos externos que la persona trabajadora ejerce durante el ciclo de trabajo. Esta estimación de esfuerzos, acompañada de los factores generales relacionados con la organización y el contexto, permiten estimar el riesgo en las zonas anatómicas consideradas: columna lumbar y cervical, hombros, codos, muñecas y rodillas.

Forces es un método que aporta valor frente a las técnicas observacionales actuales, que, si bien son las que están validadas y aceptadas por la comunidad preventiva, tienen limitaciones. El diseño conceptual de Forces se fundamenta en la información completa y precisa que ofrece un sistema de captura de movimiento. Por lo tanto, proporciona un método que libera al personal técnico evaluador de las tareas tediosas que requieren los métodos observacionales y utiliza un sistema automatizado de puntuación del riesgo que no está influenciado por la subjetividad. Además, realiza el

■ **Tabla 3** ■ Ejemplo de mapa de riesgos para cinco puestos de trabajo, valores *RiskPerMinute* [1]

	Lumbar	Cervical	Hombro D. (Should. R)	Codo D. (Elbow R)	Muñeca D. (Wrist R)	Rodilla D. (Knee R)	Hombro I. (Should. L)	Codo I. (Elbow L)	Muñeca I. (Wrist L)	Rodilla I. (Knee L)
P001	6,8%	25,4%	4,6%	11,4%	5,0%	4,5%	4,2%	10,3%	7,3%	4,7%
P002	18,2%	16,7%	7,9%	15,7%	5,9%	5,3%	11,7%	18,7%	8,1%	4,3%
P003	25,8%	22,5%	10,3%	20,0%	15,5%	18,7%	10,0%	27,8%	13,4%	18,6%
P004	13,6%	44,4%	22,4%	40,8%	36,4%	17,2%	24,4%	35,7%	37,4%	6,1%
P005	30,4%	12,6%	7,9%	8,9%	4,9%	0,0%	9,4%	10,8%	8,4%	0,4%

cálculo en multitud posturas por segundo (normalmente entre 30 y 120 posturas por segundo, según la frecuencia del sistema de captura elegido), lo que aporta un valor añadido respecto a los métodos tradicionales de evaluación de la carga postural, que se limitan a instantes elegidos por el personal evaluador, en función de las posturas que consideran que presentan un mayor riesgo según su experiencia y conocimientos previos.

En relación con la carga postural, además de las propias posturas, Forces considera los esfuerzos causados por el movimiento en las articulaciones. En cuanto al riesgo por manipulación manual de cargas, en el cálculo de esfuerzos considera también la masa del objeto manipulado y la inercia derivada de la velocidad del movimiento. Además, se analizan las posturas intermedias entre coger y dejar la carga, lo que también puede ser perjudicial para la persona trabajadora y es necesario considerar para evaluar el riesgo de manipulación manual de cargas. Todo ello posibilita ir más allá de las fuerzas verticales habituales ejercidas por la manipulación manual de cargas, permitiendo considerar una amplia gama de situaciones que se dan en la práctica.

Por último, el método permite realizar simulaciones o estudio de escenarios. Es decir, permite modificar parámetros como las fuerzas externas, los esfuerzos de torsión o incluso el percentil del modelo humano, para observar el efecto en la estimación del riesgo resultante, todo ello sin necesidad de realizar una nueva captura de movimiento. Este enfoque es

especialmente relevante para anticipar acciones de mejora específicas aplicadas a los puestos de trabajo estudiados.

Relacionado con este último punto, Marín y Marín [1] detallan un caso de uso relacionado con la fabricación de bienes de consumo. En este ejemplo se observa cómo el método Forces permite obtener el mapa de riesgos [37] de cinco puestos de trabajo, que se muestra en el ejemplo de la tabla 3. En este mapa se pueden observar los riesgos resultantes en cada articulación para cada puesto de trabajo. Este mapa de riesgos es útil para detectar los puestos de trabajo con problemas ergonómicos más significativos y que requieren más atención. Los mapas de riesgo deben entenderse como mapas dinámicos, ya que pueden cambiar, bien porque las condiciones del puesto de trabajo cambien y requieran una reevaluación ergonómica, o bien porque se estudien cambios en parámetros específicos que afecten al cálculo de Forces.

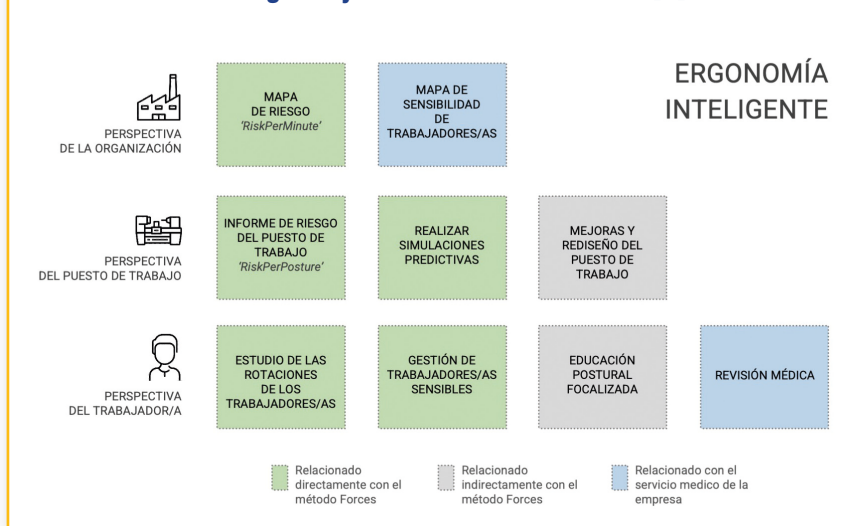
A la vista de este mapa, Forces permite combinar varias situaciones de un puesto de trabajo que pueden darse en la práctica para obtener un riesgo final más realista. En estos casos, Marín y Marín [1] recomiendan capturar las situaciones más representativas para realizar una combinación de las mismas y obtener una evaluación global del puesto de trabajo. También es posible obtener una puntuación de riesgo para una rotación entre puestos de trabajo diferentes, como los que se muestran en la tabla 3, a lo largo de una jornada laboral. En este caso, se realiza una ponderación entre los puestos de

trabajo seleccionados asignando a cada uno un tiempo de trabajo.

De acuerdo con lo anterior, el método Forces es aplicable en su contexto e implica varias ventajas prácticas. Es objetivo, el procesamiento está automatizado y está diseñado aprovechando todas las posibilidades tecnológicas que ofrecen los sistemas actuales de captura de movimiento. Por otra parte, el tiempo necesario para la medición, el procesamiento o la interpretación es reducido y no exige altos conocimientos para su uso. Adicionalmente, proporciona una visión general de los puestos de trabajo evaluados (valores *RiskPerMinute* incluidos en el mapa de riesgos) y permite profundizar en los detalles para detectar las causas (gráfico *RiskPerPosture*). Asimismo, tiene en cuenta factores externos, como el horario o el entorno de trabajo, y permite realizar simulaciones variando los parámetros y reprocesando para observar los efectos. Por último, permite combinar diferentes versiones de un puesto de trabajo y facilita el estudio de las rotaciones laborales.

Todo ello redonda en el concepto de ergonomía inteligente o 4.0 [24-27]. Marín y Marín [1] exploran cómo y hasta qué punto Forces se integra en la industria 4.0 desde tres perspectivas, que se muestran en la Figura 4: (1) el enfoque de gestión empresarial de la prevención, (2) el diseño de los elementos físicos del puesto de trabajo y (3) la perspectiva de la salud y el bienestar de las personas trabajadoras. Derivado de estas perspectivas, Forces constituye una herramienta de apoyo al trabajo para diversas áreas profesionales: prevención de riesgos

Figura 4 Acciones ergonómicas claves para la ergonomía inteligente y su conexión con Forces [1]



laborales, medicina del trabajo, terapia ocupacional, calidad o recursos humanos. Proporciona una metodología predictiva de TME que permite a las empresas aplicar una acción ergonómica inteligente ayudando a priorizar las intervenciones ergonómicas.

En cuanto a sus limitaciones o particularidades, cabe destacar que Forces no es una herramienta que proporcione una solución *per se* a los problemas y no es instantánea, sino que requiere un proceso iterativo de captación, análisis e interpretación. Sin embargo, su aplicación regular y continua aporta valor a la prevención de los TME, especialmente si se

complementa y coordina con los servicios de vigilancia de la salud.

Por otra parte, tal y como indican Marín y Marín [1], los trabajos futuros deberían estar dirigidos a realizar estudios epidemiológicos en entornos reales de producción. Este tipo de estudios permitirían medir el impacto concreto en tiempo real y a largo plazo en la reducción de molestias musculoesqueléticas, bajas, absentismo laboral, mejora de la satisfacción del entorno laboral o retención de talento. Ello fomentaría un cambio de paradigma en la cultura de prevención de riesgos laborales, necesario en la industria y sociedad actual.

CONCLUSIÓN

Se concluye que el método ergonómico Forces constituye una herramienta de apoyo al trabajo de prevención de riesgos laborales en la industria actual, su aplicación e interpretación de resultados es sencilla y ayuda a reducir los TME derivados de las tareas repetitivas y las pérdidas sociales, económicas y de productividad que dichos trastornos conllevan.

AGRADECIMIENTOS

Este método ha sido el fruto de la investigación llevada a cabo por el grupo IDERGO de la Universidad de Zaragoza durante más de una década, así como de colaboraciones con empresas, bien industriales de diferentes sectores, o bien de servicios en el ámbito de la prevención de riesgos laborales. Por tanto, nuestro mayor agradecimiento a los servicios de prevención de Quirónprevención, Volkswagen Navarra, B/S/H Electrodomésticos (Fábrica de la Cartuja, Zaragoza), Magna Automotive Spain (Aragón), Gesinor (Navarra) o Mutua Universal (Laboratorio de Ergonomía), entre otras, que han mostrado interés y han confiado en el método Forces para sus organizaciones. ●

Referencias bibliográficas

1. Marín, J.; Marín, J.J. Forces: A Motion Capture-Based Ergonomic Method for the Today's World. *Sensors* 2021, 21, 5139.
2. De Kok, J.; Vroonhof, P.; Snijders, J.; Roullis, G.; Clarke, M.; Peereboom, K.; van Dorst, P.; Isusi, I.; Munar, L.; Curtarelli, M. *Work-Related Musculoskeletal Disorders: Prevalence, Costs and Demographics in the EU*; European Agency for Safety and Health at Work: Bilbao, Spain, 2019.
3. Da Costa, B.R.; Vieira, E.R. Risk Factors for Work-related Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review of Recent Longitudinal Studies. *Am. J. Ind. Med.* 2010, 53, 285–323.
4. Karwowski, W. *Handbook of Standards and Guidelines in Ergonomics and Human Factors*; Routledge: Boca Raton, FL, USA, 2005.
5. Karlheinz, S.; Michaela, K.; Max, B.; Andrea, S.; Ralph, B. *Prevention of MSD by Means of Ergonomic Risk Assessment (Tools) in all Phases of the Vehicle Development Process*. *Work* 2012, 41, 4409–4412.
6. Mossa, G.; Boenzi, F.; Digiesi, S.; Mummolo, G.; Romano, V. *Productivity and Ergonomic Risk in Human Based Production Systems: A Job-Rotation Scheduling Model*. *Int. J. Prod. Econ.* 2016, 171, 471–477.
7. Niskanen, T.; Naumanen, P.; Hirvonen, M.L. *An Evaluation of EU Legislation Concerning Risk Assessment and Preventive Measures in Occupational Safety and Health*. *Appl. Ergon.* 2012, 43, 829–842.
8. Colombini, D. *An Observational Method for Classifying Exposure to Repetitive Movements of the Upper Limbs*. *Ergonomics* 1998, 41, 1261–1289.

9. Health Division of Biomedical; Behavioral Science. *Work Practices Guide for Manual Lifting*; U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers: Washington, DC, USA, 1981.
10. Hignett, S.; McAtamney, L. *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*. Appl. Ergon. 2000, 31, 201–205.
11. Hita-Gutiérrez, M.; Gómez-Galán, M.; Díaz-Pérez, M.; Callejón-Ferre, Á. *An Overview of REBA Method Applications in the World*. Int. J. Environ. Res. Public Health 2020, 17, 2635.
12. McAtamney, L.; Corlett, E.N. *RULA: A Survey Method for the Investigation of Work-Related Upper Limb Disorders*. Appl. Ergon. 1993, 24, 91–99.
13. Scott, G.B.; Lambe, N.R. *Working Practices in a Perchery System, using the OVAKO Working Posture Analysing System (OWAS)*. Appl. Ergon. 1996, 27, 281–284.
14. Schaub, K.; Caragnano, G.; Britzke, B.; Bruder, R. *The European Assembly Worksheet*. Theor. Issues Ergon. Sci. 2013, 14, 616–639.
15. Chander, D.S.; Cavatorta, M.P. *An Observational Method for Postural Ergonomic Risk Assessment (PERA)*. Int. J. Ind. Ergon. 2017, 57, 32–41.
16. Andreas, G.J.; Johansson, E. *Observational Methods for Assessing Ergonomic Risks for Work-Related Musculoskeletal Disorders*. A Scoping Review. Rev. Cienc. Salud 2018, 16, 8–38.
17. Boros, D.P.; Hercegfí, K. *Digital Human Modelling in Research and Development—A State of the Art Comparison of Software*. In *Proceedings of the International Conference on Human Systems Engineering and Design: Future Trends and Applications*, Munich, Germany, 16–18 September 2019; pp. 543–548.
18. Zare, M.; Biau, S.; Croq, M.; Roquelaure, Y. *Development of a Biomechanical Method for Ergonomic Evaluation: Comparison with Observational Methods*. Int. J. Soc. Manag. Econ. Bus. Eng 2014, 8, 223–227.
19. Xu, L.D.; Xu, E.L.; Li, L. *Industry 4.0: State of the Art and Future Trends*. Int. J. Prod. Res. 2018, 56, 2941–2962.
20. Perera, C.; Zaslavsky, A.; Christen, P.; Georgakopoulos, D. *Context Aware Computing for the Internet of Things: A Survey*. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2014, 16, 414–454.
21. Liao, Y.; Loures, Eduardo de Freitas Rocha; Deschamps, F. *Industrial Internet of Things: A Systematic Literature Review and Insights*. IEEE Internet Things J. 2018, 5, 4515–4525.
22. Diego-Mas, J.; Alcaide-Marzal, J.; Poveda-Bautista, R. *Errors using Observational Methods for Ergonomics Assessment in Real Practice*. Hum. Factors 2017, 59, 1173–1187.
23. Diego-Mas, J.; Poveda-Bautista, R.; Garzon-Leal, D. *Influences on the use of Observational Methods by Practitioners when Identifying Risk Factors in Physical Work*. Ergonomics 2015, 58, 1660–1670.
24. Kadir, B.A.; Broberg, O.; da Conceicao, C.S. *Current Research and Future Perspectives on Human Factors and Ergonomics in Industry 4.0*. Comput. Ind. Eng. 2019, 137, 106004.
25. Reiman, A.; Kaivo-oja, J.; Parviainen, E.; Takala, E.; Lauraeus, T. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing in the Industry 4.0 context—A Scoping Review*. Technol. Soc. 2021, 65, 101572.
26. Gášová, M.; Gašo, M.; Štefánek, A. *Advanced Industrial Tools of Ergonomics Based on Industry 4.0 Concept*. Procedia Eng. 2017, 192, 219–224.
27. Lanzotti, A.; Vanacore, A.; Tarallo, A.; Nathan-Roberts, D.; Coccorse, D.; Minopoli, V.; Carbone, F.; d'Angelo, R.; Grasso, C.; Di Giromimo, G. *Interactive Tools for Safety 4.0: Virtual Ergonomics and Serious Games in Real Working Contexts*. Ergonomics 2020, 63, 324–333.
28. Caputo, F.; Greco, A.; Egidio, D.; Notaro, I.; Spada, S. *Imu-Based Motion Capture Wearable System for Ergonomic Assessment in Industrial Environment*. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Washington, DC, USA, 24–28 July 2019; pp. 215–225.
29. Peppoloni, L.; Filippeschi, A.; Ruffaldi, E.; Avizzano, C. *A Novel Wearable System for the Online Assessment of Risk for Biomechanical Load in Repetitive Efforts*. Int. J. Ind. Ergon. 2016, 52, 1–11.
30. Vignais, N.; Miezal, M.; Bleser, G.; Mura, K.; Gorecky, D.; Marin, F. *Innovative System for Real-Time Ergonomic Feedback in Industrial Manufacturing*. Appl. Ergon. 2013, 44, 566–574.
31. ViveLab Ergo. Disponible en: <https://www.vivelab.cloud/> (consultado el 29 de junio de 2022).
32. Nawo Live. Disponible en: <https://www.xsens.com/nawolive> (consultado el 29 de junio de 2022).
33. ScaleFit. Disponible en: <https://www.scalefit.de/> (consultado el 29 de junio de 2022).
34. Boné, M.J. *Método de evaluación ergonómica de tareas repetitivas, basado en simulación dinámica de esfuerzos con modelos humanos*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2016.
35. Huston, R. *Principles of Biomechanics*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008.
36. Marín, J.; Blanco, T.; de la Torre, J.; Marín, J.J. *Gait Analysis in a Box: A System Based on Magnetometer-Free IMUs or Clusters of Optical Markers with Automatic Event Detection*. Sensors 2020, 20, 3338.
37. Felekoglu, B.; Ozmehmet Tasan, S. *Interactive Ergonomic Risk Mapping: A Practical Approach for Visual Management of Workplace Ergonomics*. Int. J. Occup. Saf. Ergon. 2020, 1–17.
38. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. *Notas Técnicas de Prevención nº 629 Movimientos repetitivos: métodos de evaluación. Método OCRA: actualización (2003) y nº 916 El descanso en el trabajo (I): pausas (2011)*.