

08-025

**COMPARATIVE ERGONOMIC STUDY OF A RENAISSANCE MECHANICAL DEVICE
USING POSTURAL ANALYSIS AND REPETITIVE MOVEMENTS CURRENT
TECHNIQUES.**

Trujillo Vilches, Francisco Javier ⁽¹⁾; Claver Gil, Juan ⁽²⁾; Sevilla Hurtado, Lorenzo ⁽¹⁾;
Sebastián Pérez, Miguel Ángel ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad de Málaga, ⁽²⁾ Universidad Nacional de Educación a Distancia

The treatise “De Re Metallica” (Georgius Agricola, 1556) is one of the first works that deals in detail with the state of the art of metal mining, refining and casting, compiling the main techniques and mechanical devices used in the mining operations of that time. In this treatise, a fairly advanced knowledge (for that time) of the human-machine set can be observed, not only from a mechanical point of view (force, torque, stroke...) but also from the perspective of its ergonomic repercussions. In the present work, an ergonomic analysis of one of the mechanical devices collected in the sixth book of this treatise is carried out. Specifically, a mine water extraction pump, powered by three different systems, is analyzed. These systems reflect an evolution of the machine not only at the mechanical level (kinematic and mechanical advantage) but also in movements, postures and safety of the operator. In order to perform this comparative analysis, current ergonomic evaluation methods based on the analysis of postural load, such as the REBA (Rapid Entire Body Assessment) method, and the analysis of repetitive movements, such as the Check List OCRA (Occupational Repetitive Action) method, have been used.

Keywords: History of machines; history of technology; mining; industrial heritage; ergonomics; safety at work.

**ESTUDIO ERGONÓMICO COMPARATIVO DE ACCIONAMIENTOS DE UN INGENIO
MECÁNICO RENACENTISTA MEDIANTE TÉCNICAS ACTUALES DE ANÁLISIS
POSTURAL Y DE MOVIMIENTOS REPETITIVOS.**

El tratado “De Re Metallica” (Georgius Agricola, 1556) es una de las primeras obras que aborda en detalle el estado del arte de la minería, recopilando las principales técnicas e ingenios mecánicos utilizados en las explotaciones mineras propias de ese momento. En este tratado se puede observar un conocimiento bastante avanzado (para la época de la que se trata) del conjunto humano-máquina, no solo desde un punto de vista mecánico (fuerza, par, carrera...) sino también desde la perspectiva de sus repercusiones ergonómicas. En el presente trabajo se realiza un análisis ergonómico de uno de los ingenios mecánicos recogidos en el sexto libro de dicho tratado. Se trata de una bomba de extracción de agua en minas, accionada mediante tres sistemas diferentes, identificados en sendos grabados. Estos sistemas reflejan una evolución o mejora de la máquina tanto a nivel cinemático y dinámico como de los movimientos, posturas y seguridad del operario. Para efectuar el análisis comparativo se han utilizado metodologías actuales de evaluación ergonómica. Para el análisis de la carga postural se ha utilizado el método REBA (Rapid Entire Body Assessment), mientras que para el análisis de movimientos repetitivos se ha utilizado el método Check List OCRA (Occupational Repetitive Action).

Palabras claves: Historia de las máquinas; historia de la tecnología; minería; patrimonio industrial; ergonomía; seguridad en el trabajo.

Correspondencia: Francisco Javier Trujillo Vilches trujillov@uma.es

Los autores agradecen a la Universidad de Málaga-Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech y a la Universidad Nacional de Educación a Distancia por su contribución a este trabajo, realizado dentro de una beca estudios de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación para el Máster en Análisis, Gestión y Proyectos del Patrimonio Industrial de la UNED.



©2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La minería y la transformación de metales mediante procesos metalúrgicos se encontraban entre las principales actividades industriales (intensivas, tecnificadas y profesionalizadas) de la Europa renacentista del siglo XVI. El nivel tecnológico de las máquinas empleadas en estas industrias ha llegado hasta nuestros días, con un razonable nivel de detalle, a través de diversos tratados técnicos, tales como *De la Pirotechnia* (Biringuccio, 1540) o *De Re Metallica* (Agricola, 1556), (Claver et al. 2018).

En concreto, el tratado *De Re Metallica* es una de las primeras obras que aborda en detalle el estado del arte de la minería y de la separación y purificación de metales. Consta de 12 libros y tiene un total de 294 figuras, recopilando las principales técnicas e ingenios mecánicos utilizados en las explotaciones mineras propias de ese momento (Barton, 2016). Esta obra fue utilizada como manual de referencia durante casi dos siglos, siendo una de las principales fuentes para el estudio de las soluciones tecnológicas adoptadas por estas industrias en aquella época. Además, contiene la primera descripción real de las enfermedades industriales de los mineros y de las formas de reducir la exposición a ellas (Donaldson, 2015).

En este tratado se observa que las principales fuentes de energía utilizadas para accionar las máquinas de uso minero eran la hidráulica y la humana. El uso de energía hidráulica quedaba restringida a explotaciones próximas a los ríos, por lo que el accionamiento humano era el más utilizado, combinado habitualmente con máquinas elementales (palancas, poleas, tornos y cuñas) debido a las limitaciones propias de accesibilidad a las minas (Beamud, Claver & Sebastián, 2017).

Aunque la palabra “ergonomía” aparece por primera vez en el libro *Compendio de Ergonomía o de la Ciencia del trabajo basada en verdades tomadas de la naturaleza*, escrito por W. Jastrzebowski en 1857 (Leirós, 2009), en estos tratados se puede intuir una cierta preocupación por la seguridad y salud de los operarios. El análisis de la obra “*De Re Metallica*” pone de manifiesto un conocimiento bastante avanzado (para la época de la que se trata) del conjunto hombre-máquina, no solo desde un punto de vista mecánico (fuerza, par, carrera...) sino también desde la perspectiva de sus repercusiones ergonómicas. En sus ilustraciones se atisba cómo la evolución de la complejidad de los sistemas y accionamientos utilizados lleva aparejada una mejora ergonómica y de la seguridad del trabajador.

En el presente trabajo se realiza un análisis ergonómico de uno de los ingenios mecánicos recogidos en el sexto libro de dicho tratado. Se trata de una bomba de extracción de agua para explotaciones mineras. En las ilustraciones del tratado se pueden observar diversos sistemas de accionamiento para esta máquina. Con objeto de comparar estos sistemas, y cuantificar las mejoras proporcionadas por cada uno de ellos, se han utilizado técnicas actuales de análisis ergonómico. Para el estudio de la carga postural se ha utilizado el método REBA (Rapid Entire Body Assessment), mientras que para el análisis de movimientos repetitivos se ha utilizado el método OCRA (Occupational Repetitive Action).

2. Metodología

La figura 1 muestra tres imágenes extraídas del libro 6 del tratado *De Re Metallica* (Agricola, 1556, pp. 177, 178 y 179). Estas imágenes ilustran el funcionamiento de una misma máquina accionada por tres sistemas diferentes. Se trata de una bomba para extracción y achique de agua mediante un sistema de pistón, de aplicación en explotaciones mineras propias de la época. Los tres sistemas proporcionan el mismo resultado o beneficio desde el punto de vista de la tarea a realizar. No obstante, tal y como se ha comentado previamente, se puede

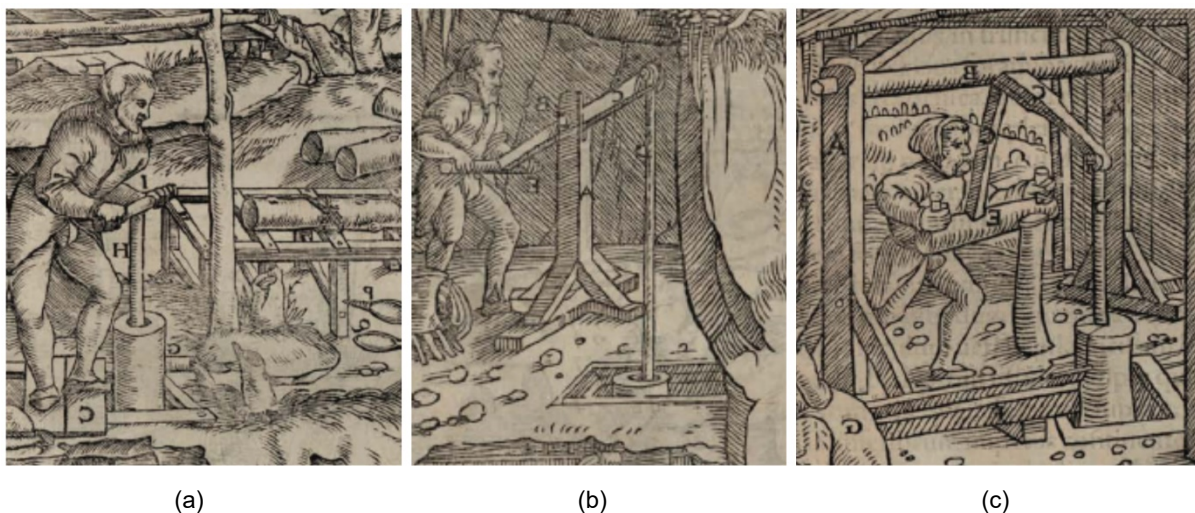
apreciar una evolución entre los tres sistemas, tanto a nivel mecánico (dinámica y cinemática de la máquina) como desde el punto de vista de la seguridad y salud del trabajador.

En el primer sistema (figura 1a) el operario se encuentra situado sobre un entramado de madera situado sobre el sumidero, a través del cual baja una tubería fabricada a partir de un tronco hueco, que posee una serie de perforaciones por las que fluye el agua. El operario, de pie sobre las tablas, tira del pistón hacia arriba elevando el agua. Cuando empuja el pistón hacia abajo se acciona una válvula que permite seguir aspirando agua.

El segundo sistema (figura 1b) es idéntico al primero en lo que se refiere al sistema hidráulico (tubería, pistón y válvula). Sin embargo, el accionamiento mecánico es diferente. En este caso se utilizan dos vigas transversales (una vertical y otra horizontal), con objeto de aplicar el efecto palanca y obtener mayor ventaja mecánica, lo que hace más fácil al trabajador la realización de la tarea. Este sistema permite, además, alejar al operario de la zona de extracción, haciendo más estable y segura la actividad.

El tercer sistema (figura 1c) es muy similar al segundo, si bien, en este caso, se erigen dos postes verticales con orificios, en la parte superior en los cuales se encaja un eje horizontal. En el centro de este eje se fijan dos barras de madera. En el extremo de una se fija el pistón y al final de la otra una pieza de madera corta, para que pueda pasar entre los dos postes y permita moverse hacia atrás y hacia adelante. Cuando el operario tira de este trozo de madera, el pistón se introduce en el tubo; cuando regresa, por su propio peso, el pistón se mueve hacia el exterior. En este caso se aprovecha no solo la ventaja mecánica proporcionada por el efecto palanca sino también la propia inercia de la máquina. Además, también proporciona una estructura más estable y alejada de la zona de extracción, respecto del primer sistema.

Figura 1: Bomba para extracción de agua en explotaciones mineras en el siglo XVI, accionada mediante diferentes sistemas (Georgius Agricola, 1556)



Además de las diferencias desde el punto de vista puramente mecánico, o de la seguridad del trabajador (distancia al pozo), la diferencia morfológica de los accionamientos hace que tanto las posturas de los operarios como la forma en la que éstos ejercen la fuerza sean distintas para cada sistema.

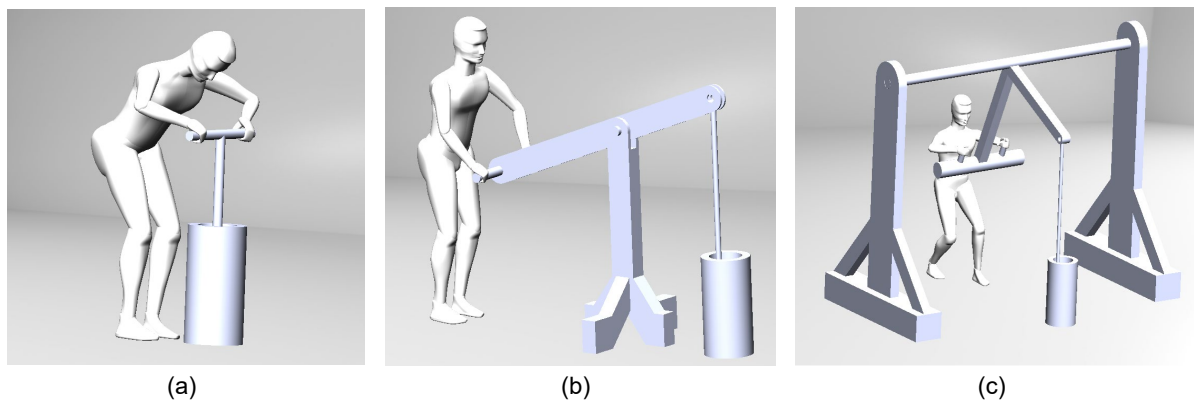
Para realizar un análisis de estas diferencias se ha recurrido al uso de un método actual de evaluación de carga postural, el método REBA (Rapid Entire Body Assessment). Se ha elegido este método dado que está diseñado para analizar los posibles riesgos músculo-esqueléticos en una amplia variedad de actividades. Además, tal y como su nombre indica, es de rápida y

fácil aplicación. Se basa en la observación de la actividad desarrollada, por lo que requiere unos recursos mínimos desde el punto de vista del equipamiento a utilizar. La aplicación del método da como resultado un indicador o puntuación que permite determinar si es necesario o no realizar alguna actuación correctora sobre el puesto de trabajo, así como la celeridad con la que se debería actuar. El sistema de puntuación tiene en cuenta la actividad muscular debida a posturas estáticas y dinámicas. Para evaluar la actividad estática divide el cuerpo en diversas partes, teniendo en cuenta tanto el tren superior (cuello, tronco, brazo, antebrazo y muñeca) como el inferior (piernas). Incluye también el efecto del valor de la carga manejada por el operario y el tipo de agarre. La actividad dinámica se tiene en cuenta analizando la frecuencia de los movimientos, su estabilidad y los cambios posturales repentinos (Secretaría de Salud Laboral de CCOO de Madrid, 2016).

Para la aplicación del método se debe seleccionar aquella postura (o conjunto de ellas) que sea más desfavorable desde el punto de vista de la duración y/o frecuencia, o que se desvíe más de una posición neutra. La mayor parte de mediciones a llevar a cabo se basan en la determinación de desviaciones angulares entre las distintas articulaciones del cuerpo, utilizándose para ello cualquier instrumento de medida que permita medición angular (un simple transportador de ángulos suele ser suficiente). Aunque las medidas se pueden realizar en el propio puesto de trabajo, a veces se trabaja sobre fotografías del trabajador adoptando la postura que se quiere analizar (Diego-Mas, 2015).

Obviamente, las posturas objeto de estudio en este trabajo son imposibles de observar *in situ*. Por ello, se han tomado como referencia las imágenes recogidas en la figura 1. Dado que se trata de imágenes estáticas, puede que no reflejen el caso más desfavorable. Para facilitar un análisis más dinámico, así como la medida de ángulos entre las distintas articulaciones, se han desarrollado sendos modelos CAD en 3D para los tres sistemas de accionamiento (figura 2).

Figura 2: Modelos CAD en 3D para los tres sistemas de accionamiento



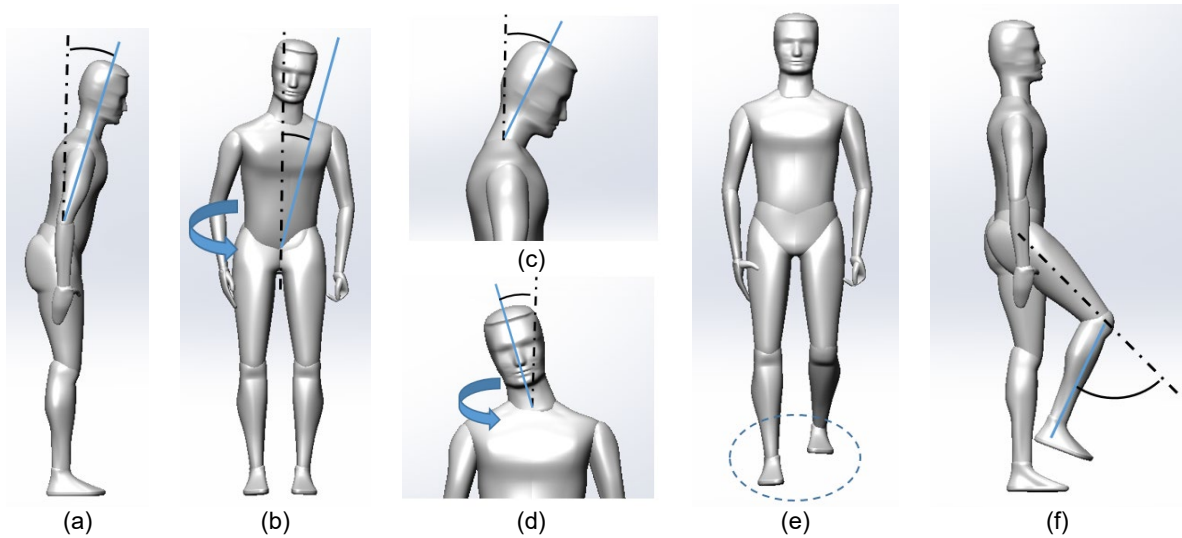
Para realizar la evaluación mediante este método se han utilizado las tablas recogidas en la nota técnica de prevención “NTP 601: Evaluación de las condiciones de trabajo: carga postural. Método REBA (Rapid Entire Body Assessment)” (Instituto Nacional de Seguridad y

Salud en el Trabajo [INSST] 2001). Estas tablas están extraídas de las notas técnicas publicadas por Hignett y McAtamney (2000).

El método REBA separa la evaluación postural en dos grupos: cuello, tronco y piernas (grupo A), al que se le añade la evaluación de la fuerza aplicada; brazo, antebrazo y muñeca (grupo B), al que se le agrega la evaluación del nivel de agarre.

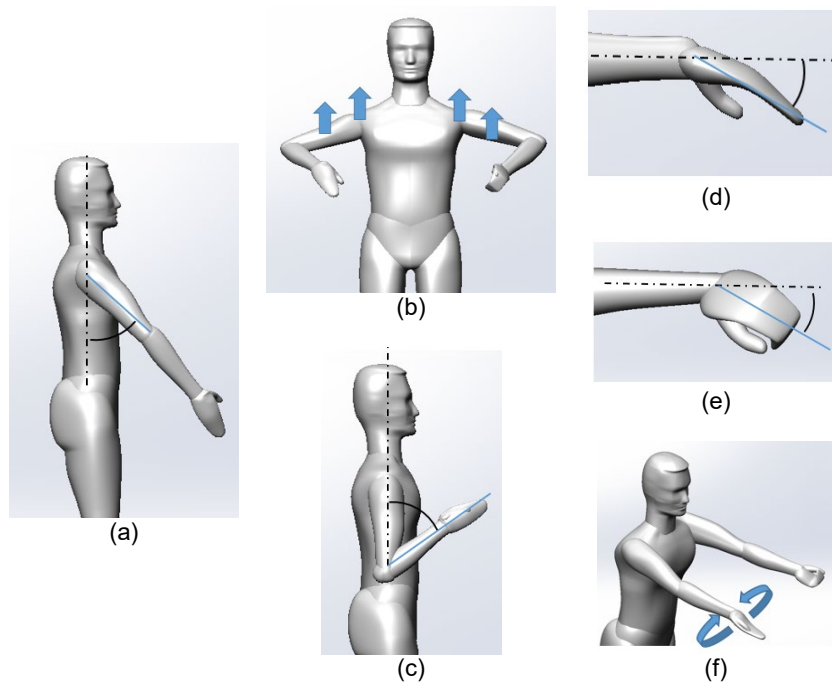
Las figuras 3 y 4 muestran los elementos evaluados para el grupo A y B respectivamente.

Figura 3: Segmentos corporales del grupo A



Nota: (a) Flexión-extensión del tronco; (b) Torsión-inclinación lateral del tronco; (c) Flexión-extensión del cuello; (d) Torsión-inclinación lateral del cuello; (e) Soporte de piernas; (f) Flexión de rodillas.

Figura 4: Segmentos corporales del grupo B



Nota: (a) Flexión-extensión del brazo; (b) Abducción-rotación del brazo, elevación del hombro, postura a favor de la gravedad; (c) Flexión del antebrazo; (d) Flexión-extensión de la muñeca; (e) Desviación lateral de la muñeca; (f) Torsión de la muñeca.

Una vez obtenidas las puntuaciones para cada grupo (mediante medición angular entre las distintas partes del cuerpo) se añade la puntuación correspondiente al tipo de actividad muscular desarrollada. Hay que tener en cuenta que el resultado de la evaluación no es mera suma de la puntuación obtenida de forma individual en cada ítem evaluado, sino que depende de la combinación de dichas puntuaciones. La puntuación global final variará entre 1 y 15 puntos, dando lugar a una clasificación del nivel de actuación en 5 tramos, que van desde el nivel 0 (riesgo inapreciable; no es necesaria la intervención) al 4 (riesgo muy alto; necesidad urgente de actuación y modificaciones en el puesto de trabajo).

El método debe ser aplicado al lado derecho e izquierdo por separado. Dadas las configuraciones a analizar en este trabajo, se ha supuesto una situación de simetría a ambos lados. Las posturas seleccionadas corresponden a los casos más desfavorables, que coinciden con las carreras finales del pistón de la bomba.

El método REBA permite realizar un análisis postural y tener en cuenta, en cierta medida, el nivel de actividad desarrollado. Sin embargo, no tiene en cuenta factores como las pausas o las interrupciones breves durante el ciclo de trabajo, ni tampoco otros factores de riesgo complementarios que pueden ser relevantes en el desarrollo de la actividad, tales como el uso de elementos de protección durante el agarre, uso de herramientas vibrantes o que provoquen compresiones en la piel, ritmos de trabajo, etc.

Para incorporar este tipo de análisis a los accionamientos objeto de estudio se ha recurrido al uso del método Check List OCRA (Occupational Repetitive Action). Este método tiene en cuenta el ciclo completo de trabajo, incluyendo periodos de actividad, de recuperación y descansos. Incorpora también un análisis postural, centrado principalmente en los miembros superiores, aunque de forma menos exhaustiva que el método REBA. Además, considera los factores de riesgo complementarios mencionados previamente. Al igual que la metodología REBA, se trata de una herramienta de fácil y rápida aplicación, basada en la observación de las tareas realizadas por el operario a lo largo de la jornada laboral y los ciclos de actividad (Diego-Mas 2015).

Tal y como se ha indicado anteriormente, la dificultad que presenta la aplicación del método al caso concreto estudiado se debe a la imposibilidad de observar las tareas objeto de análisis, siendo la única referencia la proporcionada por las imágenes de la figura 1. No obstante, se ha partido de las siguientes hipótesis, que pudieran estar dentro de lo plausible. Se ha supuesto una duración del turno de trabajo de 8 h, equivalentes a un total de 8 ciclos de trabajo (realización de un ciclo completo de trabajo cada hora); una dedicación al trabajo no repetitivo de 10 minutos en cada ciclo; un tiempo dedicado a la recuperación o pausas de 20 minutos en cada ciclo; un tiempo para el almuerzo de 1 h. Los valores globales para el turno de trabajo completo se encuentran recogidos en la Tabla 1.

Para determinar el nivel de riesgo, este método evalúa diversos factores, de forma independiente, para posteriormente ponderarlos en función de su frecuencia o repetición a lo largo del turno de trabajo (tabla 2).

Estos factores son utilizados para obtener el índice *ICKL* a través de la aplicación de la fórmula 1. El valor de *ICKL* permite clasificar el nivel de riesgo por carga repetitiva en seis grupos,

entre “óptimo” e “inaceptable alto”, así como el tipo de acción recomendada, entre “no se requiere” y “se recomienda mejora del puesto, supervisión médica y entrenamiento”.

Tabla 1: Hipótesis de partida para aplicación del método Check List OCRA

| | |
|--|---------|
| Duración del turno, <i>DT</i> | 480 min |
| Tiempo de trabajo no repetitivo, <i>TNR</i> | 80 min |
| Pausas, <i>P</i> | 160 min |
| Duración del descanso para almuerzos, <i>A</i> | 60 min |
| Número de ciclos, <i>NC</i> | 8 |
| Tiempo neto de trabajo repetitivo, <i>TNTR</i> | 180 min |
| Tiempo neto del ciclo de trabajo, <i>TNC</i> | 1350 s |

Tabla 2: Factores evaluados en el método Check List OCRA

| |
|---|
| Factor de recuperación, <i>FR</i> |
| Factor de frecuencia, <i>FF</i> |
| Factor de fuerza, <i>FFz</i> |
| Factor de posturas y movimientos, <i>FP</i> |
| Factor de riesgos adicionales, <i>FC</i> |
| Multiplicador de duración, <i>MD</i> |

$$ICKL = (FR + FF + FFz + FP + FC) \cdot MD \quad (1)$$

Para el cálculo de los factores de la Tabla 2 y del índice *ICKL* se ha utilizado la nota técnica de prevención “NTP 629: Movimientos repetitivos: métodos de evaluación: Método OCRA” (INSST, 2003), así como la hoja de cálculo desarrollada por el INSST a tal efecto.

Dado que el análisis postural se ha abordado, de forma exhaustiva, mediante la aplicación del método REBA a las tres configuraciones, y que los ciclos de trabajo, pausas, ritmos y factores de riesgo complementarios son similares en los tres sistemas de bombeo, el método Check List OCRA ha sido aplicado solo a la tercera configuración.

3. Resultados

La tabla 3 recoge los resultados obtenidos en la evaluación mediante el método REBA de las posturas recogidas dentro del Grupo A, así como el nivel de carga aplicado, para cada uno de los tres sistemas de accionamiento analizados. A la vista de las puntuaciones obtenidas, se puede decir que el primer sistema es el que presenta unos peores resultados, mientras que los sistemas 2 y 3 presentan resultados similares.

Las principales diferencias entre el sistema 1 y los otros dos radican en la puntuación obtenida para la posición del cuello y el tronco, así como en el nivel de carga. La ubicación del operario, justo encima del sumidero de extracción de agua, y el sistema mecánico adoptado hacen que la postura sea mucho más forzada, dando lugar a una mayor flexión de espalda y cuello. Por otra parte, el uso de los sistemas mecánicos de palanca proporciona una ventaja mecánica adicional en los sistemas 2 y 3 que facilita la labor del operario, reduciendo el nivel de carga a aplicar. Aunque en el sistema 3 se aprovecha la inercia debida al sistema de accionamiento,

hay que tener en cuenta que esta inercia es solo favorable en el ciclo de movimiento del pistón hacia arriba, mientras que es necesario vencerla en sentido contrario.

El sistema 3 presenta cierta ventaja con respecto al 2 en lo que respecta a la posición del tronco, encontrándose totalmente erguido. Adicionalmente, el cambio en la configuración mecánica de la palanca hace que el esfuerzo aplicado sea principalmente horizontal, frente a una aplicación vertical en los sistemas 1 y 2. Respecto de la posición de las piernas, la postura es similar en todos los casos, existiendo soporte bilateral.

No obstante, el método REBA no tiene en cuenta el riesgo adicional que supone la ubicación del operario sobre la zona de extracción de agua, en una posición inestable sobre un entramado de madera. Para los sistemas 2 y 3, el sistema empleado permite un alejamiento del operario de la zona de extracción, haciendo la tarea más estable y segura.

Tabla 3: Resultados de la evaluación del Grupo A (tronco, cuello y piernas) para cada uno de los sistemas de bombeo

| | Elemento evaluado | Evaluación | Puntuación |
|-----------|-------------------|--|------------|
| Sistema 1 | Cuello | El cuello está extendido o flexionado más de 20 grados. No existe torsión o inclinación lateral del cuello. | 2 |
| | Tronco | El tronco está entre 20 y 60 grados de flexión o más de 20 grados de extensión. No existe torsión o inclinación lateral. | 3 |
| | Piernas | Existe flexión de rodillas entre 30 y 60 grados. Soporte bilateral, andando o sentado. | 2 |
| | Nivel de Carga | Entre 5 y 10 kg. No hay instauración rápida o brusca. | 1 |
| Sistema 2 | Cuello | El cuello está entre 0 y 20 grados de flexión; No existe torsión o inclinación lateral del cuello. | 1 |
| | Tronco | El tronco está entre 0 y 20 grados de flexión o entre 0 y 20 grados de extensión. No existe torsión o inclinación lateral. | 2 |
| | Piernas | Existe flexión de rodillas entre 30 y 60 grados. Soporte bilateral, andando o sentado. | 2 |
| | Nivel de Carga | Menor de 5 kg (teniendo en cuenta la ventaja mecánica proporcionada por el sistema de palanca frente al sistema 1). No hay instauración rápida o brusca. | 0 |
| Sistema 3 | Cuello | El cuello está entre 0 y 20 grados de flexión. No existe torsión o inclinación lateral del cuello. | 1 |
| | Tronco | El tronco está erguido. No existe torsión o inclinación lateral. | 1 |
| | Piernas | Existe flexión de rodillas entre 30 y 60 grados. Soporte bilateral, andando o sentado. | 2 |

| | | |
|----------------|---|---|
| Nivel de Carga | Menor de 5 kg (teniendo en cuenta la ventaja mecánica proporcionada por el sistema de palanca frente al sistema 1). No hay instauración rápida o brusca. | 0 |
|----------------|---|---|

La tabla 4 recoge los resultados obtenidos en la evaluación de las posturas recogidas dentro del Grupo B, así como el nivel de agarre, para cada uno de los sistemas estudiados. Si bien se aprecian diferencias en las puntuaciones obtenidas para cada sistema, éstas son menores que las observadas en el grupo A. El sistema 1 es el que obtiene una peor puntuación, debido principalmente a la mayor flexión del brazo y la muñeca, así como a la postura elevada de los hombros en el final de carrera del pistón. Por otra parte, para este grupo de segmentos corporales, es el sistema 2 el que presenta cierta ventaja sobre el 3, debido a una menor flexión del brazo. Respecto del nivel de agarre, todos los sistemas presentan un buen agarre y fuerza de agarre.

Tabla 4: Resultados de la evaluación del Grupo B (brazo, antebrazo y muñeca) para cada uno de los sistemas de bombeo

| | Elemento evaluado | Evaluación | Puntuación |
|-----------|-------------------|---|------------|
| Sistema 1 | Brazo | El brazo está entre 21 y 45 grados de flexión o más de 20 grados de extensión. Hay apoyo o postura en favor de la gravedad. El hombro está elevado (final de carrera del pistón). | 2 |
| | Antebrazo | El antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión. | 1 |
| | Muñeca | La muñeca está flexionada o extendida más de 15 grados. No hay torsión o desviación lateral. | 2 |
| | Agarre | Buen agarre y fuerza de agarre. | 0 |
| Sistema 2 | Brazo | El brazo está entre 21 y 45 grados de flexión o más de 20 grados de extensión. Hay apoyo o postura en favor de la gravedad. El hombro no está elevado. | 1 |
| | Antebrazo | El antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión. | 1 |
| | Muñeca | La muñeca está flexionada o extendida menos de 15 grados. No hay torsión o desviación lateral. | 1 |
| | Agarre | Buen agarre y fuerza de agarre. | 0 |
| Sistema 3 | Brazo | El brazo está entre 46 y 90 grados de flexión. Hay apoyo o postura en favor de la gravedad. El hombro no está elevado. | 2 |
| | Antebrazo | El antebrazo está entre 60 y 100 grados de flexión. | 1 |
| | Muñeca | La muñeca está flexionada o extendida menos de 15 grados. No hay torsión o desviación lateral. | 1 |
| | Agarre | Buen agarre y fuerza de agarre. | 0 |

En la tabla 5 se muestra la puntuación obtenida al evaluar el nivel de actividad. Los tres sistemas han obtenido la misma puntuación, debido a que las frecuencias con la que se repiten los movimientos son similares y no existen cambios bruscos posturales.

Tabla 5: Resultados de la evaluación de la actividad

| Elemento evaluado | Evaluación | Puntuación |
|--------------------------------|--|------------|
| Sistemas 1, 2 y 3 Actividad | Hay una o más partes del cuerpo estáticas aguantadas más de 1 min. Hay movimientos repetitivos, con repetición superior a 4 veces/minuto. No hay cambios posturales importantes o posturas inestables. | 2 |

La tabla 6 recoge el resumen de la evaluación mediante el método REBA para cada uno de los sistemas. Se observa como el sistema 1 es el que presenta una puntuación final mayor (8 puntos), siendo el nivel de riesgo por carga postural “alto”, recomendándose una rápida intervención sobre el puesto de trabajo. Tal y como se ha indicado previamente, esto viene originado por una peor postura de cuello, tronco, hombros y muñecas, así como de la aplicación de una mayor carga, al no utilizar algún tipo de accionamiento que proporcione cierta ventaja mecánica.

El sistema 2 presenta bastante mejor puntuación que el 1 (4 puntos), debido a la mejora de los déficits posturales que presenta el sistema 1, además de reducir la carga aplicada por uso de un sistema de palanca. Para este sistema el nivel de riesgo es medio, siendo necesaria la intervención, pero con menor premura que en el sistema 1. Las posibilidades de mejora de este puesto se centran principalmente en el grupo A. Aunque este sistema presenta ciertas mejoras con respecto al 3 en lo que se refiere a la flexión del brazo, este hecho no se ve reflejado en una mejor puntuación en el grupo B.

El sistema 3 es el que presenta un mejor resultado (3 puntos), aunque muy similar al sistema 2. La mejora respecto del sistema 2 viene de la mano de una mejora en el grupo A, principalmente por el uso de una postura erguida en el tronco. En este caso el nivel de riesgo es bajo, pudiendo ser necesaria la intervención.

Como se desprende del análisis realizado, la evolución del sistema de accionamiento desde el punto de vista mecánico implica, además, una evolución y mejora de la carga postural del puesto de trabajo.

Tabla 6: Resultados finales de la evaluación mediante el método REBA para cada uno de los sistemas de bombeo

| | Puntuación | | |
|--|------------|-----------|-----------|
| | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 3 |
| Grupo A. Cuello, tronco y extremidades inferiores + Carga/Fuerza | 6 | 3 | 2 |
| Grupo B. Brazos, antebrazos y muñecas + Agarre | 2 | 1 | 1 |
| Combinación de A y B | 6 | 2 | 1 |
| Actividad | 2 | 2 | 2 |
| Puntuación final | 8 | 4 | 3 |
| Nivel de riesgo | Alto | Medio | Bajo |
| Nivel de acción | 3 | 2 | 1 |

| | | | |
|-----------------------------------|------------------|-----------|---------------------|
| Intervención y posterior análisis | Necesario pronto | Necesario | Puede ser necesario |
|-----------------------------------|------------------|-----------|---------------------|

Estos resultados, obtenidos mediante el uso de datos tabulados, se han contrastado con los obtenidos a través de la aplicación informática desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, alojada en el portal de ergonomía “ergonautas.upv.es”, arrojando idénticos resultados (Ergonautas 2006).

En la tabla 6 se recogen los resultados del análisis de los factores de riesgo por trabajo repetitivo para el sistema 3. La evaluación mediante este método arroja un resultado muy desfavorable. La puntuación final es de 30.8, siendo el nivel de riesgo “no aceptable - nivel alto”. Este resultado se debe principalmente a un factor de fuerza (*FFz*) muy elevado (24 puntos), obtenido al considerar el uso de fuerza intensa durante un tiempo prolongado. El factor de posturas y movimientos (*FP*) presenta también un valor alto (11 puntos). Si se compara con la aplicación del método REBA, el resultado es mucho más desfavorable. Esto es debido a que el método Check List OCRA no considera las posturas de cabeza, cuello, tronco o extremidades inferiores, en las que se han observado diferencias notables entre los tres sistemas. Por tanto, este método es menos sensible a las mejoras posturales observadas al evolucionar el sistema de accionamiento. El cálculo del *FP* para los tres sistemas arrojaría el mismo resultado.

Respecto del resto de factores que tienen en cuenta aspectos no evaluados en el método REBA, tales como el tiempo de recuperación (*FR*), la frecuencia de movimientos o los factores de riesgo complementarios, éstos presentan valores razonablemente bajos.

Tabla 6: Factores de riesgo y valoración por trabajo repetitivo del sistema 3 mediante el método Check List OCRA

| Factores de riesgo | Evaluación | Lado del cuerpo | |
|--|---|-----------------|-----------|
| | | Derecho | Izquierdo |
| Factor de recuperación (<i>FR</i>) | Existe una interrupción de al menos 8/10 minutos cada hora. | 0 | 0 |
| Factor de frecuencia (<i>FF</i>) | Existen acciones técnicas dinámicas. Los movimientos de los brazos son bastante rápidos (cerca de 40 acciones/min) pero con posibilidad de breves interrupciones. No hay acciones técnicas estáticas. | 3 | 3 |
| Factor de fuerza (<i>FFz</i>) | La actividad laboral implica el uso de fuerza intensa (puntuación 5-6-7 de la escala de Borg), para tirar o empujar palancas, más del 10% del tiempo. | 24 | 24 |
| Hombro | Los brazos no descansan sobre la superficie de trabajo sino que están ligeramente elevados durante algo más de la mitad del tiempo. | 1 | 1 |
| Codo | No se realizan movimientos de flexo-extensión superiores a 60° y no existe prono-supinación. | 8 | 8 |
| Muñeca | No existe extensión-flexión en una posición extrema o postura molesta. | 8 | 8 |
| Mano-dedos | La actividad se realiza con la mano casi completamente abierta (presa palmar) durante casi todo el tiempo. | 8 | 8 |
| Estereotipo | Presencia del movimiento del hombro y/o codo/muñeca/manos idénticos, repetidos casi todo el tiempo. | 3 | 3 |
| Factor de posturas y movimientos (<i>FP</i>) | Evaluado a partir de la puntuación para codo, muñeca, manos-dedos y estereotipo. | 11 | 11 |

| | | | |
|---|--|----------------------------|------|
| Factor de riesgos adicionales (<i>FC</i>) | Existe presencia de movimientos repentinos, bruscos con frecuencia de 2 o más por minuto. Se emplean herramientas que provocan compresión sobre las estructuras musculosas y tendinosas. El ritmo de la máquina está determinado por la máquina, pero existen “espacios de recuperación” por lo que el ritmo puede acelerarse o desacelerar. | 3 | 3 |
| Multiplicador de duración (<i>MD</i>) | Evaluado a través de las hipótesis de partida (Tabla 2). | 0.75 | 0.75 |
| Índice de riesgo (<i>ICKL</i>) | | 30.8 | 30.8 |
| Valoración | | No aceptable Nivel alto | |

Por tanto, se puede decir que se trata de un método que permite tener una idea general del nivel de riesgo por acciones repetitivas para este tipo de accionamientos en su conjunto, pero que no permite discriminar dicho nivel entre los tres accionamientos analizados. En este sentido, es necesario tener en cuenta que tanto el método utilizado como las hipótesis de partida se ajustan más a una jornada de trabajo y nivel de actividad basados en la legislación laboral actual. Son, por tanto, bastante conservadores, teniendo en cuenta que, con toda probabilidad, el número de horas de la jornada laboral era muy superior en aquella época (siglo XVI). Si se hubiera aplicado un método de similares características en aquel momento, se habrían necesitado un mayor número de niveles de riesgo o una redistribución de la escala de puntuaciones, teniendo en cuenta la existencia de trabajos más duros que los analizados. En ese caso, posiblemente los resultados habrían arrojado un nivel de riesgo medio en lugar de extremo.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado un análisis de los riesgos posturales y de aplicación de acciones repetitivas sobre tres sistemas de accionamiento de una bomba para extracción de agua en minas, recogida en el tratado renacentista “De Re Metallica”. Para ello, se han aplicado técnicas actuales de análisis ergonómico. Para el análisis postural se ha utilizado el método REBA, mientras que para el análisis de acciones repetitivas se ha utilizado el método Check List OCRA.

La aplicación del método REBA ha puesto de manifiesto que la evolución y mejora mecánica observada entre los tres sistemas lleva aparejada una reducción de los riesgos posturales del puesto de trabajo. El primer sistema es el que ha mostrado un nivel de riesgo más alto, debido a una peor postura en los miembros superiores, tronco y cuello. Esto se ve agravado por la utilización de un sistema de accionamiento que no proporciona ninguna ventaja mecánica. Los sistemas 2 y 3 han mostrado un nivel de riesgo medio y bajo respectivamente. Ambos sistemas aplican un sistema de basado en la palanca que reduce el esfuerzo a realizar. Esto conlleva un cambio en la configuración del accionamiento mecánico que produce una mejora postural, principalmente en el tren superior. El tercer sistema ha presentado ciertas mejoras sobre el segundo en lo que se refiere a la postura de tronco y cuello, debido a la aplicación de la carga de forma más horizontal que en los otros dos sistemas. Adicionalmente, el segundo y tercer sistema alejan al operario de la zona de extracción, haciendo que la actividad desarrollada sea más estable y segura.

El análisis mediante el método Check List OCRA se ha aplicado al tercer sistema de accionamiento. El resultado obtenido sitúa la actividad realizada en el nivel de riesgo más alto, debido principalmente a la aplicación de una fuerza intensa durante un tiempo prolongado. El factor postural arroja también un valor muy alto, en comparación con el análisis realizado

mediante el método REBA. Esto es debido a que este método no realiza un análisis tan detallado de la carga postural, dejando fuera del análisis ciertas partes del cuerpo. Este método es, por tanto, menos sensible a las mejoras posturales observadas entre los tres sistemas. El resto de factores que tienen en cuenta pausas, tiempo de recuperación, frecuencia de movimientos y factores de riesgo complementarios, han mostrado unos valores medios o bajos.

Aunque la aplicación de estos métodos requiere una observación de la actividad, que no es posible en el caso analizado, las figuras recogidas en “De Re Metallica” permiten, de forma razonable, apuntar a una evolución paralela de los sistemas mecánicos utilizados y de la seguridad y salud del trabajador. Agricola se preocupa de analizar (para una misma bomba de achique) qué sistema de accionamiento permite un mejor acoplamiento operario-máquina para conseguir, por un lado, un mayor rendimiento del trabajo y, por otro, unas condiciones de trabajo más favorables. Se trata, por tanto, de un ejemplo de ergonomía práctica y real aplicada al diseño de máquinas que data del siglo XVI, época muy anterior a la aparición (por primera vez) del concepto de ergonomía.

Referencias

- Agricola, G. (1556). *De Re Metallica: De la minería y los metales*. Traducción de Carmen Andreu Peon. Madrid: Unión Española de Explosivos, 1992, Editorial Casariego.
- Agricola G. (1950). *De Re Metallica*. Translated from the first Latin edition of 1556 by Herbert Clark Hoover and Lou Henry Hoover. New York: Dover Publications, Inc. Disponible en: <https://www.gutenberg.org/files/38015/38015-h/38015-h.htm>
- Barton, I. (2016). Georgius Agricola's *De Re Metallica* in early modern scholarship. *Earth sciences history*, 35, 265–282. doi: 10.17704/1944-6178-35.2.265
- Beamud, E.M., Claver, J., & Sebastián, M.A. (2017). Análisis tipológico de máquinas de empleo en minería consideradas en tratados técnicos del Renacimiento. XVII Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero, Almadén (Spain).
- Biringuccio, V. (1540). *Pirotechnia*. Venecia: Kessinger Publishing (edición facsímil, 2010).
- Claver, J., García-Domínguez, A., Sevilla, L., & Sebastián, M.A. (2018). Tecnologías de fabricación en la Europa de las primeras décadas del siglo XVI según los contenidos del tratado “De la pirotechnia” de Vanoccio Biringuccio. X Congreso Internacional sobre Minería y Metalurgia Históricas en el SW Europeo, Molina de Aragón (Spain). doi: 10.13140/RG.2.2.20341.93923
- Diego-Mas, J.A. (2015). Evaluación postural mediante el método REBA. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia. Disponible online: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/reba/reba-ayuda.php>
- Diego-Mas, J.A. (2015). Evaluación del riesgo por movimientos repetitivos mediante el Check List Ocrá. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia. Disponible online: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/niosh/niosh-ayuda.php>
- Donaldson, IML. (2015). Agricola's *De re metallica*, 1556. Part I. *Journal of the Royal College of Physicians of Edinburgh*, 45, 180-182. <http://dx.doi.org/10.4997/JRCPE.2015.218>
- Ergonautas (2006). Ergonomía en el trabajo y prevención de riesgos laborales. Obtenido el 26 de marzo de 2021, de Universidad Politécnica de Valencia: <https://www.ergonautas.upv.es/>
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, 201-205. doi:10.1016/S0003-6870(99)00039-3
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2001). Nota Técnica de Prevención NTP 601: Evaluación de las condiciones de trabajo: Carga postural. Método REBA (Rapid Entire Body Assessment). Disponible en: <https://www.insst.es/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2003). Nota Técnica de Prevención NTP 629: Movimientos repetitivos: métodos de evaluación Método OCRA: actualización. Disponible en: <https://www.insst.es/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion>

Leirós, L.I. (2009). Historia de la Ergonomía, o de cómo la Ciencia del Trabajo se basa en verdades tomadas de la Psicología. Revista de Historia de la Psicología, 30, 33-53.

Secretaría de Salud Laboral de CCOO de Madrid (2016). Métodos de evaluación ergonómica. Disponible en: <http://www.saludlaboralmadrid.es/portfolio-item/metodos-de-evaluacion-ergonomica>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

