



UNA REVISIÓN DE HERRAMIENTAS DE LA FATIGA, EL TIEMPO DE RECUPERACIÓN Y SUS RELACIONES CON LA CALIDAD

A REVIEW OF FATIGUE TOOLS, RECOVERY TIME AND THEIR RELATIONSHIPS WITH QUALITY

Romel Ullilen-Marcilla*
Carolina Ullilen-Marcilla**

Resumen: La literatura científica sobre los modelos o herramientas relacionados con la fatiga en el lugar de trabajo son escasos, poniendo poco énfasis en la recuperación del trabajador. Los modelos actuales para estimar la fatiga están asociados con la disminución de la capacidad de fuerza muscular y el posterior fracaso de la tarea relacionada con aspectos de la calidad del trabajo. Existen proyectos en desarrollo para disponer de mejores herramientas que sirvan de guía a los profesionales en Ergonomía para determinar las demandas físicas aceptables en una amplia variedad de tareas. Asimismo, la elección e interpretación de las herramientas o modelos de fatiga es un desafío, ya que pueden variar las repuestas de múltiples mediciones del cansancio según la tarea. En este trabajo, se presenta un conjunto de modelos que abordan el desarrollo de la fatiga principalmente durante un trabajo simulado y; también, la confluencia de fatiga-recuperación. Las herramientas que se señalan permiten desentrañar estas relaciones no casuales entre las mediciones, los efectos de la fatiga y el resultado de calidad en los ciclos de trabajo.

Palabras clave: Modelo de fatiga, recuperación, calidad, ciclo de trabajo.

Abstract: Scientific literature on models or tools related to fatigue in the workplace is scarce, placing little emphasis on worker recovery. Current models for estimating fatigue are associated with decreased muscle strength capacity and subsequent task failure related to aspects of work quality. There are projects to provide better tools to guide ergonomics professionals to determine acceptable physical demands in a wide variety of tasks. Likewise, the choice and interpretation of fatigue tools or models is a challenge, because the responses of multiple fatigue measurements may vary according to the task. In this article a set of models is presented in order to address the development of fatigue mainly during simulated work and the confluence of fatigue-recovery. These tools allow us to understand the non-casual relationships between measurements, the effects of fatigue and the quality result in work cycles.

Keywords: Fatigue model, recovery, quality, work cycle.

*Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Correo electrónico: romel.ullilen1209@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6633-8002>

**Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Correo electrónico: cullilenm@uni.edu. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7631-5015>. Autora de correspondencia.

Recepción: 04.03.2024 / Revisión: 06.03.2024 / Aceptación: 17.05.2024

Introducción

El presente trabajo surge del interés de muchas empresas en el Perú, principalmente del sector industrial en los cuales predomina las tareas repetitivas y el trabajo dinámico físico, por querer conocer el tiempo de recuperación que requiere el trabajador en relación a la fatiga experimentada durante el desarrollo de sus actividades laborales.

En la ergonomía convencional, se busca rediseñar puestos de trabajos enfocándose hacia una menor carga de trabajo, pero esto puede resultar un problema en ciertos casos, conllevando a una fatiga persistente (Yung, Neumann, Yazdani y Kapellusch, 2023). En este sentido, la comprensión de la generación del cansancio y la recuperación resulta importante para los profesionales en Ergonomía. Más aún, se sugiere que los ergónomos dispongan de herramientas que manejen indicadores relacionados con la acumulación de la fatiga, tiempo de recuperación posteriores, entre otros y, de esa manera, diseñar lugares de trabajos más seguros y productivos (Wells et al., 2007).

El término fatiga puede resultar a veces complejo de entenderlo desde el punto de vista científico, pero es un aspecto importante para los ergónomos al relacionarla con el trabajo. Village et al. (2015) mencionan que el conocimiento de la fatiga permite encontrar formas de engancharnos con los objetivos de las organizaciones. La fatiga sería entonces como un moderador entre los factores humanos y el rendimiento de los procesos, como por ejemplo al considerar aspectos en relación con la calidad.

En este contexto, el predecir los impactos de la fatiga en la calidad de los sistemas de fabricación, puede permitir a los ergónomos contribuir en la organización (Neumann et al., 2020). Más aún, si se busca controlar las pérdidas económicas causadas por fallas en el diseño del sistema productivo, siendo necesario realizar mediciones de la fatiga relacionándola con resultados del rendimiento del sistema productivo a fin de permitir una mejor orientación en la toma de decisiones entre los equipos de diseño y los gerentes responsables del desarrollo y gestión de las operaciones (Potvin, 2012).

El presente trabajo abarca los modelos existentes, incluidos matemáticos, que proporcionan información sobre el curso temporal de la fatiga, relaciones de trabajo/descanso, el trayecto de la capacidad de fuerzas de los músculos, entre otros. Esto resulta particularmente relevante para la ergonomía, ya que a menudo encontramos métodos limitados para recomendar cargas aceptables en ciclos de trabajo, por ejemplo, en tareas repetitivas que prevalecen en la mayoría de los entornos laborales (Potvin, 2012).

Es importante señalar que las pausas de recuperación son consideradas como una interrupción en el proceso de producción y disminuyen el tiempo de disponibilidad, pero son necesarias para aliviar la fatiga acumulada (Di Pasquale et al., 2013). El tiempo de recuperación insuficiente puede ocasionar que el daño en los tejidos progrese con el tiempo a pesar de las intervenciones ergonómicas (Takatani y Bruchal, 2017). Se debe establecer pausas que permitan una adecuada recuperación con la ayuda de modelos de compensación

consistentes con los modelos de fatiga. Los autores Ma et al. (2015) proponen considerar diferentes parámetros fisiológicos en los modelos de recuperación, los cuales podrían dar lugar a grandes discrepancias entre estos, más aún si no se consideran diferencias individuales (ejemplo: la edad).

El presente trabajo surge de la necesidad de informar a las industrias acerca de la consideración de la fatiga en los sistemas de trabajo, teniendo los siguientes objetivos:

- Dar a conocer los modelos y las herramientas de estimación de la fatiga muscular asociados con cambios en el tiempo de recuperación y variables de procesos (ejemplo: calidad).
- Señalar que la medición de la fatiga requiere de un conjunto de pruebas, para reducir los impactos en el rendimiento del sistema.

El alcance de la revisión de documentos científicos apunta a tener información relacionada con mediciones de la fatiga física de forma objetiva o subjetiva, procesos superpuestos entre fatiga-recuperación y evaluación de desempeño del trabajador a nivel de la calidad en relación a la fatiga. Se busca también mostrar las diversas miradas que existen en la medición de la fatiga a fin de prevenir lesiones en el futuro. Por último, es importante tener en cuenta el uso de modelos matemáticos como parte del proceso de aprendizaje en los futuros ergónomos.

Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda de la literatura y revisión de artículos, considerándose 4 pasos.

Paso 1: Planificación del desarrollo del estado de arte

En la planificación del desarrollo del estado de arte, se procede a seleccionar las siguientes palabras claves (Keywords) tales como: Work Rest, Fatigue Quality, recovery model, model fatigue, cumulative fatigue, equation fatigue. De esta manera, se pretende obtener artículos con similitud en cuanto al objetivo del presente trabajo.

Paso 2: Definición de estrategia de búsqueda en bases de datos

Luego de definir las palabras claves, se procede a buscar la información a través de revistas científicas tales como: Elsevier, Proquest, Redalyc, Scielo, Taylor & Francis Online y Ebsco. Todo esto permitió obtener artículos confiables, planteándose las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los recursos de investigación y su relación con la ergonomía?
- ¿Cuántos años de antigüedad tiene el artículo?
- ¿Cuál es la problemática del artículo?
- ¿Cuáles son las herramientas que se usaron para solucionar el problema?
- ¿Tiene sustento estadístico, computacional o matemático?

Paso 3. Selección de artículos

En este paso, se tiene en consideración los siguientes criterios:

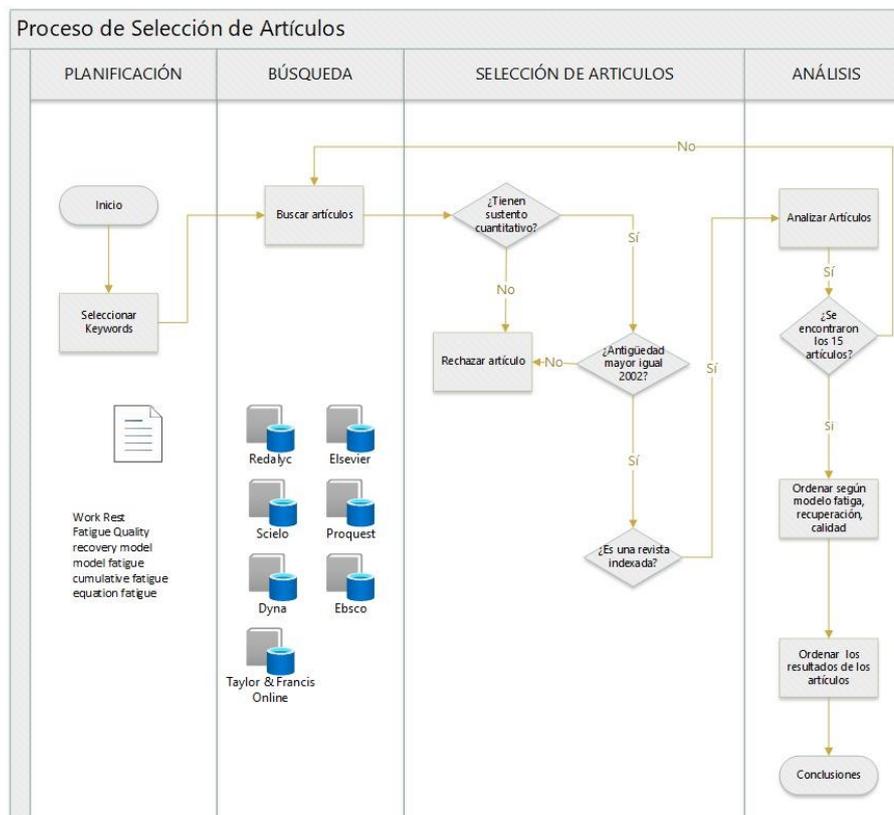
- Aporte: Herramientas de cuantificación y evaluación que se usaran en el trabajo de investigación.
- Tema: Una revisión de herramientas de la fatiga y tiempo recuperación y, su relación con la calidad.
- Escenario: Ergonomía, modelos basados en propiedades neurales, bioquímicas, morfológicas, psicofísica, biomecánicas y fisiológicas del músculo esquelético humano.
- Idioma: inglés / español / francés / otros.
- Antigüedad: A partir del año 2002, excluyendo las fuentes principales como en el caso de libros.
- Tipo de Documentos: Artículos científicos.

Paso 4. Análisis y síntesis de artículos

Se analiza la información obtenida en los artículos científicos, y se realiza una síntesis de los casos en relación a la fatiga, la recuperación y el impacto en la calidad, con implicancias a nivel de la Ergonomía.

Con los artículos encontrados, se realizó un diagrama del proceso de selección de artículos, donde se muestra los 4 pasos señalados:

Figura 1. Procesos de selección de artículos.



En total, se hallaron 56 artículos en la búsqueda inicial relacionados con la cuantificación de la fatiga y su relación con la calidad y recuperación. Para este estudio, se obtuvo 36 artículos los cuales fueron analizados y ordenados para finalizar con las conclusiones. Se excluyeron artículos por su antigüedad menor al año 2002 y revista no indexada.

Resultados y discusión

Según Yung, Neumann, Yazdani y Kapellusch, (2023), la literatura acerca del tiempo de recuperación basada en las exposiciones en el lugar de trabajo es escasa, ya que se ha hecho poco énfasis en la recuperación en el trabajo (denominado interno recuperación) y durante el tiempo no laboral (referido como externo recuperación). Además, la relación de la fatiga y la recuperación se encuentran vinculadas, pero no son constructos idénticos; la fatiga es una consecuencia de la falta de recuperación más que un concepto que describe el proceso de recuperación. Por lo tanto, se requiere de una mejor comprensión para determinar los factores que no solo afectan la fatiga, sino también aquellos que afectan la recuperación interna y externa (fuera del trabajo).

Uno de los artículos con especial atención sobre la fatiga corresponde al hallazgo de Rose et al. (2014) que señala que el desarrollo de las fuerzas más bajas (por ejemplo, 10% MVF-fuerza voluntaria máxima) puede constituir un problema de los TME (trastornos musculoesqueléticos), ya que este nivel de fuerza conduce a una fatiga persistente significativa y tiempos de recuperación prolongados. De ser cierto, esto sería contrario a la ergonomía convencional que propone diseñar tareas con menos carga de trabajo.

La recuperación de la fatiga muscular puede comprenderse mejor que la recuperación del microdaño tisular, a causa de la dificultad de medir la acumulación del daño mecánico tisular y la recuperación/reparación in vivo (Mehdizadeh et al., 2020; Neumann et al., 2020; Takatani y Bruchal, 2017). Existe una brecha en la investigación al no saber si la recuperación (descanso) de la exposición mecánica permitirá la recuperación del tejido, por lo que podríamos considerar al descanso desde una perspectiva de la capacidad de generación de fuerza de recuperación después de la fatiga (Veerassamy et al., 2022). Aún sigue siendo aceptado que la falta de una recuperación suficiente de la tolerancia tisular en los turnos de trabajo puede ocasionar que la patología específica del tejido progrese a pesar de realizar intervenciones ergonómicas (Takatani y Bruchal, 2017).

En lo concerniente a la acumulación de exposición mecánica, Veerassamy et al. (2022) realizaron una revisión del alcance de las teorías de las causas relacionadas con las lesiones musculoesqueléticas, haciendo referencia a seis artículos que describían teorías relacionadas con la acumulación de la fatiga muscular como una causa subyacente de los TME, a través de las contracciones musculares que generan fuerza constante o que generan fuerza variable en el tiempo. En estos artículos, el riesgo de lesión está implícito, pero no cuantificado explícitamente. Las relaciones entre la acumulación de la fatiga muscular y el desarrollo de TME siguen siendo escasos, lo que limita el uso de la evaluación de acumulación de fatiga en casos de multitareas (Neumann et al., 2020).

También, el artículo de Veerasammy et al. (2022) mencionan que la acumulación de fatiga puede reducir la capacidad de generación de fuerza a través de una combinación de factores centrales y periféricos, y quizás también provocar daños en las fibras musculares. Para Yung et al. (2020), el término fatiga es impreciso desde una perspectiva científica, pero resulta fácilmente comprensible para gerentes e ingenieros (en comparación con el término de la fuerza de cizallamiento espinal acumulada, por ejemplo) y tiene el potencial de convertirse en un concepto unificador digno de tenerlo en cuenta por los ingenieros y los ergónomos. Asimismo, la posibilidad de desarrollar la atención de la gestión de la fatiga en la organización puede, por lo tanto, obtener más apoyo organizacional y recursos para mejorar las condiciones de trabajo (Neumann y Village, 2012).

En los hallazgos de Rose et al. (2020), los modelos matemáticos de trabajo-descanso utilizando un análisis de "punto de ruptura" (que define el límite en el ciclo de trabajo donde la fatiga comienza a acumularse), mostraron diferencias considerables en los resultados. El tiempo resulta un tema crítico en el desarrollo de los TME y se encuentra en un punto de intersección entre los objetivos de ingeniería y ergonomía (Wells et al., 2007).

Los esfuerzos en la creación de modelos de recuperación de la fatiga ampliamente aplicables pueden requerir más investigación sobre los factores que influyen en la variabilidad de los procesos de acumulación y recuperación de la fatiga. La preocupación es cual modelo debe usarse para cierto puesto de trabajo y cuando aplicarlo. Por otro lado, en un hallazgo de Ma et al. (2015) se describe el proceso de recuperación en el lenguaje de las matemáticas a través de ecuaciones diferenciales. A partir de este modelo matemático de recuperación, se generan ecuaciones sobre el tiempo capaz de reproducir el proceso de recuperación muscular.

El proceso de recuperación es complejo y hay diferentes factores involucrados en la recuperación (ejemplo: edad, sexo), según Ma et al. (2015). Una sola medición para detectar una sola función o proceso en la cadena causal de la fatiga no es un enfoque razonable, particularmente por su naturaleza dependiente de la tarea (Yung & Wells, 2017). Existen una serie de ventajas al documentar las mediciones de la fatiga en el lugar de trabajo, haciendo que la elección e interpretación del tipo de medición sea un desafío.

Yung y Wells (2017) emplearon un conjunto de mediciones a nivel de la fatiga tales como temblores del cuerpo, la percepción de la fatiga, la electromiografía, donde identificaron el predominio del mecanismo de la fatiga (es decir, contribuciones significativas de la fatiga central o periférica a la fatiga neuromuscular), reflejando alteraciones tanto centrales como periféricas a nivel muscular y también, el patrón de desarrollo de la fatiga (es decir, la interacción entre las deficiencias centrales y periféricas). Asimismo, observó diferencias entre las tareas (ej. pausas para descansar versus sin pausas para descansar).

En este contexto, se sugiere que los ergónomos con su conocimiento de la fatiga humana, encuentren nuevas formas de promover la aplicación de los factores humanos al contribuir directamente a la calidad, para conectarse con los objetivos de la organización (Village et al., 2015). Esto es una forma de relacionar mejor la fatiga con el rendimiento del sistema (calidad), a través de mediciones de la fatiga. La calidad es un aspecto poderoso en las organizaciones que reciben recursos y atención de la que tradicionalmente se otorga a los

"factores humanos", mejorando las condiciones de trabajo (Neumann y Village, 2012).

Según Kolus et al. (2020), es probable que la variación en la respuesta de la fatiga hacia la calidad dependa en gran medida de la naturaleza de las tareas, incluida su complejidad, precisión o fuerzas necesarias para completar la tarea con éxito. Dode et al. (2016) utilizaron un enfoque de modelamiento de eventos discretos de la fatiga, obteniendo que en la combinación de la fatiga acumulada durante la tarea y la recuperación después de una pausa en el trabajo, la dosis de fatiga muscular representaba el 26 % de la variación de la calidad del producto en un sistema de fabricación de productos electrónicos.

En otro estudio realizado en la tarea de montaje por Bosch et al. (2011), los niveles de fatiga percibido fueron más altos durante un ritmo bajo que durante un ritmo alto, lo cual fue sorprendente a primera vista. Por otro lado, el número de errores que mide la calidad del trabajo, se duplicó al comparar el ritmo de trabajo alto con el ritmo de trabajo bajo, por lo que trabajar a una velocidad más alta conlleva a una menor precisión en el objetivo a nivel de calidad. Se abre la hipótesis de que algunos de los efectos cinemáticos del cambio de ritmo de trabajo a uno alto pueden tener un efecto preventivo sobre el desarrollo de la fatiga acumulada, pero afectando la calidad del trabajo.

En un estudio realizado por Meyer y Apud (2003) en el sector forestal en Chile, se llevó a cabo una evaluación a brigadistas en incendios de larga duración, donde se evidenció que los trabajadores experimentaban fatiga. Además, tanto el rendimiento como la calidad iban disminuyendo. Una de las variables utilizadas es la carga cardiovascular para cuantificar la carga de trabajo, en función de la frecuencia cardiaca en el tiempo. Se mostró de forma cuantitativa, que esta variable tenía valores elevados superando el 40%, por lo cual, la recuperación de trabajo era insuficiente para incendios de más de una hora.

En lo que concierne al error humano, un trabajo de investigación analizó la confluencia de aprendizaje-olvido y fatiga-recuperación y los efectos sobre la confiabilidad para medir el error humano en el diseño de sistemas de producción. Este modelo matemático propuesto por Givi et al. (2015) captura la tasa a la que se acumula la fatiga en un trabajo. El análisis del modelo demuestra que la probabilidad de error humano y los déficits relacionados a los sistemas productivos, disminuyen con un aprendizaje más rápido, una fatiga más lenta y velocidades de recuperación más rápidas.

Cabe señalar que hay muchas herramientas orientadas a la ergonomía física para determinar la aceptabilidad de una tarea aislada, pero casi ningún método disponible para estimar la fatiga muscular y el riesgo de lesión de TME en el caso típico de trabajadores que realizan una combinación de tareas, incluido con breves períodos de descanso.

Potvin y Fuglevand (2017) propusieron un modelo para predecir el curso temporal de la fatiga muscular total en función de las capacidades de fuerza cambiantes de las unidades motoras individuales en respuesta a las exigencias de las tareas, pudiendo emplearse para diseñar programas de ejercicio y rehabilitación, y establecer proporciones de trabajo/descanso para optimizar el estímulo del ejercicio. Asimismo, estos autores proponen un modelo acerca de las respuestas variables de las neuronas motoras (MU) individuales a través de ecuaciones matemáticas, cuya acción colectiva contribuye a la trayectoria de los cambios en la capacidad de fuerza muscular durante una actividad prolongada. Dado que

resulta difícil representar la complejidad de la fatiga, ellos agruparon los factores de la fatiga en dos categorías generales: periférica y central. No obstante, Frey Law y Avin (2010) señalan que aún debe haber un consenso sobre qué modelo proporciona las predicciones más precisas del desarrollo de la fatiga.

Middlesworth (2014) señala que las directrices publicadas actualmente sobre el riesgo de lesiones en cierta región del cuerpo y los tiempos de recuperación son insuficientes para su uso en los programas de prevención de lesiones en el trabajo. Cabe agregar que en el artículo de Frey Law y Avin (2010), se menciona que la resistencia a la fatiga varía en las articulaciones primarias del cuerpo, por lo que se requiere comprender mejor los mecanismos subyacentes responsables de las variaciones en el desarrollo de la fatiga y cómo minimizar sus posibles secuelas negativas.

Por otro lado, Sean Gallagher publicó su libro en 2022 sobre el mecanismo de falla por fatiga (el número de ciclos de tensión o deformación que soporta una muestra antes de que ocurra una falla) a nivel de los trastornos musculoesqueléticos, relacionando el tiempo de fatiga de un material con los tejidos biológicos, donde las células tienen un factor adicional que es la capacidad de repararse debido al estrés repetido. Gallagher y Habberger (2013) hicieron una revisión de literatura, concluyendo que los estudios epidemiológicos y la evidencia de los estudios de falla por fatiga en los tendones ocasionan una interacción similar entre la fuerza y la repetición, con rápidos aumentos en el riesgo y una rápida progresión del daño a medida que aumenta la fuerza.

Takatani y Bruchal (2017) utilizaron el modelo de falla por fatiga de daño acumulativo para predecir y prevenir lesiones en el hombro. La parte más desafiante del modelo es la estimación de las fuerzas de tracción. Ahora, las diferentes fibras de colágeno y las estructuras que forman el tendón del hombro tienen diferentes capacidades para realizar su función, que es ayudar a los tejidos a resistir el estiramiento. A niveles de estrés muy alto, el daño del tendón en el hombro se presenta como fibras desorganizadas y se observa esto hasta en un 12% del área del tendón (Fung et al., 2008). Con exposición repetida sin un tiempo suficiente de recuperación, el daño estructural del tendón resultará en desgarros parciales o totales (Thornton y Hart, 2011).

Actualmente, estos modelos de falla por fatiga del material no están diseñados para relacionarlos con las características de un individuo tales como la edad. Existen estudios donde hacen predicciones sobre el impacto de la edad en la fatiga, proporcionando una mejor comprensión de los posibles mecanismos fisiológicos como el fenómeno de la resistencia a la fatiga, tal como veremos a continuación.

Es así que existe un modelo computacional de Callahan et al. (2016) para predecir las concentraciones de metabolitos en reposo después de las contracciones, y las relaciones que existen entre la perturbación bioenergética y las limitaciones en la capacidad de generación de fuerza. Cabe señalar que este modelo utilizó un sistema de ecuaciones que dictan la excitación neural, la activación muscular, la cinética contráctil y las perturbaciones metabólicas (Callahan et al. 2013). El artículo de Lanza et al. (2006), señala que Callahan se basó en estudios relevantes que asocian la fatiga con el fosfato inorgánico diprotanado $[H_2PO_4]$. El flujo glucolítico no oxidativo en sí mismo no causa fatiga, sino que facilita la

formación de $[H_2PO_4]$ limitando la capacidad de generación de fuerza; por lo que la tendencia de los jóvenes a depender de esta provisión glucolítica de ATP, es el mayor contribuyente a diferencias relacionadas con el aumento de la edad en la fatiga neuromuscular.

Existen una serie de variables que deben determinarse para establecer niveles aceptables de fatiga, recuperación, fuerza, entre otros. Los parámetros asociados con la producción no deben verse afectados por la capacidad del trabajador y las características de la tarea. Asimismo, los ergónomos pueden requerir el uso de ecuaciones matemáticas para establecer un nivel máximo aceptable de la carga de trabajo. Uno de los modelos relacionados con las matemáticas, fue realizado por Potvin (2012), quien llevo a cabo un metaanálisis de datos psicofísicos con el fin de predecir los esfuerzos máximos aceptables en relación con el máximo esfuerzo voluntario (MVE).

Potvin realizó comparaciones de los datos de fatiga de cinco estudios fisiológicos. La ecuación matemática propuesta está diseñada para tareas relativamente estereotipadas con características similares, la cual se desarrolló para ayudar a los profesionales en ergonomía a estimar las fuerzas y torsiones aceptables en el lugar de trabajo, y no para describir teóricamente los mecanismos subyacentes que gobiernan estos límites. En base a este modelo, es posible evaluar trabajos más complejos compuesto por múltiples subtareas. Asimismo, el método RCRA (Cantidad recomendada de descanso acumulado) de Murray y Potvin (2017) se emplea para calcular el esfuerzo máximo aceptable (MAE) de una subtarea aislada cuando es parte de un trabajo más grande con otras subtareas.

Cabe precisar que existe distintas repuestas de fatiga muscular, analizándose a través de estudios objetivos (ej. %MVC) y subjetivos (ej. percepción del esfuerzo). En el estudio realizado por Abdel-Malek, Foley et al. (2022), se exploró estas repuestas cuando se realizó en un laboratorio una tarea isométrica intermitente de las extremidades superiores con diferentes cargas de trabajo a lo largo de la curva TLV "Threshold Limit Values" de ACGIH (2016), considerando criterios científicos de protección de la salud, a través de la ecuación de Potvin.

Tabla 1. Artículos que abordan la fatiga como un factor importante en la ergonomía, la calidad y la recuperación.

Nº	Estudio	Tipo de estudio (o tipo de industria)	Nombre del modelo	Presentación de ecuaciones matemáticas en el artículo	Objetivo de cálculo	Medidas de la fatiga
1	Rose et al. (2020)	Laboratorio experimentos	Modelos de trabajo-descanso utilizando un análisis de "punto de ruptura"	Sí (varias ecuaciones de distintos autores, matemáticas simples)	Tiempo de asignación de descanso en el ciclo de trabajo	Porcentaje de la contracción voluntaria máxima
2	Liang et al. (2015)	Laboratorio experimentos	Modelo simple de recuperación	Sí (ecuaciones diferenciales)	Tasa de recuperación (R) para una	Magnitud de la fuerza máxima ejercible

Nº	Estudio	Tipo de estudio (o tipo de industria)	Nombre del modelo	Presentación de ecuaciones matemáticas en el artículo	Objetivo de cálculo	Medidas de la fatiga
			muscular local		determinada articulación o grupo muscular	
3	Yung et al. (2017)	Laboratorio y en campo	Patrón Temporal del desarrollo de la fatiga	No	Utilizar una batería de medidas de fatiga central y periférica para observar los efectos de la intensidad de la tarea	Las contracciones voluntarias máximas, la fatiga auto percibida, temblores y electromiografía
4	Dodé et al. (2016)	Campo (ensamblaje de productos electrónicos)	Un enfoque para integrar tanto los patrones humanos de recuperación de la fatiga como el aprendizaje humano	Sí (simulación de eventos discretos)	Correlacionar la dosis de la fatiga con los déficits de calidad	Porcentaje de la contracción voluntaria máxima utilizando el método de predicción de carga del hombro y fatiga auto percibida
5	Bosch et al. (2011)	Trabajo de montaje y laboratorio	La variabilidad del motor y la fatiga durante el trabajo de montaje ligero	No (se mostró tratamiento estadístico)	Efectos de la variable independiente tiempo sobre el número promedio de errores (calidad) y la calificación de la fatiga percibida	Porcentaje de la contracción voluntaria máxima, la fatiga auto percibida, umbral de dolor, electromiografía
6	Apud et al. (2003)	Laboratorio y en campo	La mejora del rendimiento de brigadistas forestales	No	Establecer el efecto de la duración de los incendios en la carga cardiovascular, el rendimiento y, la calidad del trabajo	Capacidad aeróbica, carga cardiovascular, umbral ventilatorio, composición corporal
7	Givi et al. (2015)	Laboratorio (recopilación de resultados de investigaciones de otros autores)	Modelado de la confiabilidad del trabajador con	Sí (fatiga: modelo exponencial) y estadística para el efecto de parámetros	Estimar la tasa de error (calidad) humano al realizar un	Porcentaje de la contracción voluntaria máxima, la fatiga auto

Nº	Estudio	Tipo de estudio (o tipo de industria)	Nombre del modelo	Presentación de ecuaciones matemáticas en el artículo	Objetivo de cálculo	Medidas de la fatiga
			aprendizaje y fatiga	independientes con análisis factorial	trabajo de ensamblaje bajo la influencia del aprendizaje-olvido y la fatiga-recuperación	percibida, esfuerzo de trabajo estático y dinámico
8	Potvin et al. (2017)	Laboratorio	Modelo de fatiga muscular basado en unidades motoras	Sí (ecuación matemática del cambio relacionado en la fatiga con la capacidad de fuerza de la unidad motora)	Predecir la fatiga muscular para una variedad de tareas y para ilustrar las respuestas contráctiles individuales de las unidades motoras	Las propiedades o mecanismo fisiológicos de las unidades motoras
9	Takatani et al. (2017)	Laboratorio	Los modelos de falla por fatiga de tendones en el hombro	Sí (el índice de riesgo de hombro)	Evaluar con mayor precisión el riesgo de lesiones en el hombro durante un período de trabajo	Estudios de falla por fatiga, los tendones están expuestos a ciclos de carga con fuerzas determinadas, lo que provoca daños materiales
10	Callahan et al. (2016)	No (Usando valores reportados en la literatura)	Modelo computacional que predice con precisión la fatiga en respuesta a MVC en humanos	Sí (ecuación de formación de $[H_2PO_4^-]$)	Predecir el retorno a las concentraciones de metabolitos en reposo después de las contracciones y las relaciones que existen entre la perturbación bioenergética y las limitaciones en la capacidad de generación de	Procesos fisiológicos, desde activación neural hasta la bioenergética intracelular, implicados en la fatiga neuromuscular

Nº	Estudio	Tipo de estudio (o tipo de industria)	Nombre del modelo	Presentación de ecuaciones matemáticas en el artículo	Objetivo de cálculo	Medidas de la fatiga
					fuerza (es decir, la fatiga)	
11	Murray et al. (2020)	Laboratorio	El modelo de evaluación de la cantidad de descanso acumulado recomendada	Sí (ecuación del tiempo de recuperación por ciclo (en segundos))	Determinar el esfuerzo máximo aceptable (% MVC) para una subtarea aislada dentro del contexto de las otras subtareas que componen el trabajo completo	Mecanismos psicofísicos y/o fisiológicos para guiar la predicción de esfuerzos repetidos submáximos aceptables

Investigación futura

La eficiencia de los métodos o modelos mencionados es variable en función de los datos disponibles y su interpretación. A pesar del limitado número de estudios encontrados, los hallazgos respaldan las perspectivas actuales sobre la calidad y la recuperación que pueden estar influenciados por la fatiga.

A pesar de las dudas sobre la precisión y la aplicación de los modelos mostrados, la fatiga y los modelos de trabajo-descanso tienen un gran potencial para sustentar cambios en la mejora de los sistemas de trabajo. Sin embargo, se debe tener cuidado al aplicar estos modelos para establecer umbrales y gestionar la exposición a la fatiga de los empleados, según Neumann et al. (2020).

Se requiere mayor investigación como, por ejemplo, para predecir un “punto de ruptura” cuando la carga de trabajo ya no es sostenible. Se necesita una mayor verificación de los modelos en una variedad de escenarios de aplicación. Las ecuaciones matemáticas se obtienen bajo diferentes condiciones de trabajo específicas y no pueden extenderse fácilmente a otras condiciones de trabajo. De hecho, esta limitación ha sido parcialmente superada en el modelo de recuperación muscular propuesto por Ma Liang et al. (2015) con dos términos: el nivel de fatiga inicial y el atributo de recuperación individual R. No obstante, existen algunos problemas en la aplicación de este modelo de Liang, uno de ellos es cómo cuantificar el parámetro R (tasa de recuperación) para diferentes grupos musculares de una población determinada al utilizar el modelo de recuperación.

Según Yung y Wells (2017), los estudios futuros deben permitir una mejor explicación de las relaciones entre las mediciones y los efectos de la fatiga, pudiendo variar los valores de respuesta de las evaluaciones. Dichos autores emplearon un conjunto de mediciones, encontrando diferencia entre las tareas (ejemplo: contracción intermitente versus sostenida) las cuales dependen de su intensidad. Los estudios futuros deben documentar la fatiga

durante varios días de trabajo y determinar la relación entre el desarrollo de la fatiga, el rendimiento y su impacto sobre la salud.

Actualmente, hay muchos trabajos en la industria que aún requieren la intervención del hombre. Es importante tener en cuenta que los seres humanos son propensos a cometer errores por muchas razones relacionadas con el entorno de trabajo, dando como resultado un deterioro de la calidad. Meyer y Apud (2003) mostraron en el sector forestal que el tiempo dedicado a actividades de alta exigencia física tiene una alta incidencia negativa en la calidad. Givi et al. (2015) desarrollaron un modelo matemático que captura la tasa a la que se acumula la fatiga y estima la probabilidad de cometer errores en base a estudios anteriores.

El modelo de falla por fatiga de Takatani et al. (2017) presenta algunas limitaciones en la región del hombro. La compresión del tendón no está incluida en el modelo, solo se considera las fuerzas de tracción. Asimismo, el modelo no tiene en cuenta las diferencias individuales. Estos autores señalan que añadir estos factores como un acelerador en el modelo sería un problema al cuantificar y probablemente no sea significativo. Por otro lado, Callahan et al. (2016) incorporaron una amplia gama de componentes fisiológicos que podrían influir en la fatiga, pero la complejidad del modelo no se acerca a la del sistema neuromuscular humano.

La ecuación de Potvin, (2012) se desarrolló para ayudar a los profesionales de ergonomía a estimar las fuerzas y torsiones aceptables en el lugar de trabajo, y no para modelar teóricamente los mecanismos subyacentes que gobiernan estos límites. Se trató de ajustar una ecuación a los datos psicofísicos empíricos, debido a la escasez de estudios psicofísicos de las extremidades superiores publicados en población masculina, solo los datos del género femenino contribuyeron al desarrollo de la ecuación actual.

Los estudios señalados en este trabajo hacen referencia que la fatiga es un moderador entre los factores humanos determinante en el diseño de los sistemas de trabajo y el rendimiento de calidad observado en los procesos operativos. Encontramos ecuaciones propuestas por algunos autores que proporcionan límites y ciclos de descanso claros y aceptables para la actividad laboral, teniendo en consideración las interacciones entre la postura, la fuerza y la repetición. Estos modelos podrían emplearse para establecer límites de exposición y crear ciclos de trabajo - descanso que permitan diseñar puestos de trabajo sostenibles en el futuro y estimar el riesgo de TME.

Conclusiones

El presente trabajo es un intento de abordar la fatiga, la recuperación y la calidad, con el fin de analizar, cuantificar y documentar sistemáticamente estas variables. Aunque la fatiga se reconoce como un problema multidimensional, se mostró la existencia de un interés creciente por parte de los académicos en relación a este tema. Se constató la existencia de modelos matemáticos con el fin de realizar mediciones analíticas para determinar los efectos de la fatiga, la recuperación en la productividad y la calidad.

En la tabla 1, se muestra un resumen de modelos y herramientas que permiten estimar

la fatiga muscular asociada con cambios en el tiempo de recuperación y variables de procesos (ejemplo: calidad); de los cuales se encontró 8 estudios que detallan las ecuaciones de forma explícita y la interpretación de cada una de las variables. Se puede concluir que existen herramientas de evaluación a nivel de la fatiga, los cuales nos permiten establecer el impacto entre el rendimiento y/o la calidad. Estas herramientas constituyen una gran ayuda en la planificación de las tareas en el futuro, evitando que los trabajadores las desarrollen con altas o pocas exigencias físicas.

Se concluye que los resultados de las investigaciones identificadas son útiles para establecer nuevas directrices o criterios en los gerentes de operaciones, los diseñadores de trabajo y los analistas de producción, para el análisis de las tareas en el puesto de trabajo, gracias a la existencia de un conjunto de mediciones relacionadas a la fatiga. En un futuro inmediato, las empresas deben prestar atención a la fatiga al diseñar trabajos que requieren gran empleo de mano de obra, de lo contrario corren el riesgo de tener efectos negativos en la calidad del producto y el proceso, afectando el rendimiento del sistema. Finalmente, el diseño de puestos de trabajo con un enfoque ergonómico genera menos fatiga y reduce los errores humanos con impacto favorable en la producción.

Referencias

- Abdel-Malek, D. M., Foley, R. C. A., Wakeely, F., Graham, J. D., & La Delfa, N. J. (2022). Exploring Localized Muscle Fatigue Responses at Current Upper-Extremity Ergonomics Threshold Limit Values. *Human factors*, 64(2), 385–400. <https://doi.org/10.1177/0018720820940536>
- Bosch, T., Mathiassen, S. E., Visser, B., de Looze, M. P., & van Dieën, J. H. (2011). The effect of work pace on workload, motor variability and fatigue during simulated light assembly work. *Ergonomics*, 54(2), 154–168. <https://doi.org/10.1080/00140139.2010.538723>
- Callahan, D. M., Umberger, B. R., & Kent, J. A. (2016). Mechanisms of in vivo muscle fatigue in humans: investigating age-related fatigue resistance with a computational model. *The Journal of physiology*, 594(12), 3407–3421. <https://doi.org/10.1113/JP271400>
- Callahan DM, Umberger BR & Kent-Braun JA (2013). A computational model of torque generation: neural, contractile, metabolic and musculoskeletal components. *PLoS ONE* 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056013>
- Di Pasquale V. & Iannone R. & Salvatore M. & Riemma S. (2013). An Overview of Human Reliability Analysis Techniques in Manufacturing Operations. *Operations Management*.
- Dode, P., Greig, M., Zolfaghari, S. & Neumann, W.P. (2016). Integrating Human Factors into Discrete Event Simulation: A Proactive Approach to Simultaneously Design for System Performance and Employees' Well Being. *International Journal of Production Research*, 54, 3105-3117.
- Frey Law, L. A., & Avin, K. G. (2010). Endurance time is joint-specific: a modelling and meta analysis investigation. *Ergonomics*, 53(1), 109–129. <https://doi.org/10.1080/00140130903389068>
- Fung, D.T., V.M. Wang, D.M. Laudier, J.H. Shine, J. Basta-Pljakic, K.J. Jepsen, M.B. Schaffler, and E.L. Flatow. (2008). Subrupture Tendon Fatigue Damage. *Journal of Orthopedic Research*, 27, 264–273. <https://doi.org/10.1002/jor.20722>
- Gallagher, S., & Haberberger, J.R. (2013). Examining the Interaction of Force and Repetition on Musculoskeletal Disorder Risk: A Systematic Literature Review. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 55(1), 108–124. <https://doi.org/10.1177/0018720812449648>
- Murray, G. & Potvin, J. (2017). Calculating the Maximum Acceptable Effort for an Isolated Subtask While Still Accounting for the Demands of all Other Subtasks.
- Lanza IR, Wigmore DM, Befroy DE & Kent-Braun JA (2006). In vivo ATP production during free-flow and ischaemic muscle contractions in humans. *J Physiol* 577, 353–367. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.114249>
- Ma, L., Zhang, W., Wu, S., & Zhang, Z. (2015). A new simple local muscle recovery model and its theoretical and experimental validation. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 21(1), 86–93. <https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1017961>
- Mehdizadeh, A., Vinel, A., Hu, Q., Schall, M.C., Gallagher, S. & Sesek, R.F. (2020). Job rotation and work-related musculoskeletal disorders: a fatigue-failure perspective. *Ergonomics*, 63, 461–476. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1717644>.
- Meyer, F., & Apud, E. (2003). Aplicaciones ergonómicas para la mejoría del rendimiento de los brigadistas de incendios forestales. *Ingeniería Industrial*, 2.
- Middlesworth, M. (2014). "Injury Prevention Tip: Preventing Rotator Cuff and Shoulder Injuries." *Ergonomics Plus*, December 29. Accessed 22 September 2015. <http://ergo-plus.com/injury-prevention-tip-preventing-rotator-cuff-and-shoulder-injuries-2/>

- Neumann, W.P., & Village, J. (2012). Ergonomics action research II: a framework for integrating HF into work systems design. *Ergonomics*, 55(10), 1140–1156.
- Neumann, W.P., Motiwala, M., & Rose, L.M. (2020). A comparison of work-rest models using a “breakpoint” analysis raises questions. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/24725838.2020.1857315>
- Potvin, J. R. (2012). Predicting Maximum Acceptable Efforts for Repetitive Tasks: An Equation Based on Duty Cycle. *Human Factors*, 54(2), 175–188. <https://doi.org/10.1177/0018720811424269>
- Potvin, J. R., & Fuglevand, A. J. (2017). A motor unit-based model of muscle fatigue. *PLoS computational biology*, 13(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005581>
- Rose, L.M., Neumann, W.P., Hägg G.M., & Kenttä, G. (2014). Fatigue and Recovery during and after Static Loading. *Ergonomics* 57(11), 1696–1710. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952347>
- Veerasammy, S., Davidson, J.B. & Fischer, S.L. (2022). Multi-task exposure assessment to infer musculoskeletal disorder risk: A scoping review of injury causation theories and tools available to assess exposures. *Applied Ergonomics*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103766>
- Takatani, K.C., & Bruchal, L.C. (2017). A new approach to prevent overuse injuries of the rotator cuff supraspinatus tendon using the cumulative fatigue concept. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 18, 455–475. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2017.1284281>
- Thornton, G.M., & Hart, D.A. (2011). The Interface of Mechanical Loading and Biological Variables as They Pertain to the Development of Tendinosis. *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions* 11(2), 94–105.
- Village, J., Searcy, C., Salustri, F., & Neumann, W.P., (2015). Designing for human factors (DfHF): a grounded theory for integrating human factors into production design processes. *Ergonomics* 58(9), 1529–1546.
- Wells, R., Mathiassen, S.E., Medbo, L., & Winkel, J. (2007). Time – a Key Issue for Musculoskeletal Health and Manufacturing. *Applied Ergonomics*, 38, 733-744.
- Yung, M., Kolus, A., Wells, R., & Neumann, W.P. (2020). Examining the fatigue-quality relationship in manufacturing. *Applied Ergonomics*, 82, 102919. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102919>.
- Yung, M., Rose, L. M., Neumann, W. P., Yazdani, A., & Kapellusch, J. (2023). Is there a u-shaped relationship between load levels and fatigue and recovery? An examination of possible mechanisms. *Ergonomics*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2183850>
- Yung, M., & Wells, R. P. (2017). Responsive upper limb and cognitive fatigue measures during light precision work: An 8- hour simulated micro-pipetting study. *Ergonomics*, 60(7), 940–956.
- Yung M. & Wells R.P. (2017). Documenting the Temporal Pattern of Fatigue Development. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 5(3-4), 115-135. <https://doi.org/10.1080/24725838.2017.1373714>
- Givi Z.S., Jaber M.Y., & Neumann, W.P. (2015). Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modelling*, 39(17), 5186-5199. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.038>



Todos los contenidos de la revista **Ergonomía, Investigación y Desarrollo** se publican bajo una [Licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) y pueden ser usados gratuitamente, dando los créditos a los autores y a la revista, como lo establece la licencia