

CONTRIBUIÇÕES DAS TECNOLOGIAS EMERGENTES PARA AÇÕES COM FOCO NA ERGONOMIA NO SETOR DE ARMAZENAGEM E BENEFICIAMENTO DE GRÃOS

CONTRIBUTIONS OF EMERGING TECHNOLOGIES TO ACTIONS FOCUSED ON ERGONOMICS IN THE GRAIN STORAGE AND PROCESSING SECTOR

TIPO DE ARTIGO: Artigo de Revisão

Autores: Mattioni V¹, Bandeira M², Franz L³, Bemvenuti R⁴, Pereira A⁵,

RESUMO

Introdução

A Indústria 4.0 tem na sua essência os princípios de inovação, integração de processos e uso de novas tecnologias, com foco na obtenção de produtos de alta qualidade a custos acessíveis. A ergonomia é relevante neste contexto, pois apesar das melhorias advindas das novas tecnologias, os conflitos entre produção e fatores humanos persistem, especialmente por pressões financeiras e de desempenho. A agroindústria, por sua vez, apesar do protagonismo na economia brasileira, não consta como um setor que se utilize das tecnologias emergentes abrangidas na Indústria 4.0, sobretudo quando se associam os temas ergonomia e o setor de armazenagem e beneficiamento de grãos.

Objetivo

O objetivo desse trabalho é verificar quais são as contribuições das tecnologias emergentes aplicáveis a ações de melhoria em ergonomia no setor de armazenagem e beneficiamento de grãos

Metodologia

Para esta revisão sistemática da literatura, utilizou-se o método PRISMA, além da organização e do tratamento de dados por planilhas eletrônicas e software para análise de conteúdo. O método PICo foi empregado para auxiliar a construir as perguntas de pesquisa a serem respondidas ao longo do estudo.

¹ Victor Mattioni

Formado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pelotas. MORADA COMPLETA PARA CORRESPONDÊNCIA DOS LEITORES: Rua Lino do Amaral, Bairro Centro, cidade Ijuí/RS, Cep 98700000. E-MAIL: victor.mattioni1@gmail.com. Nº ORCID: 0009-0004-9881-640X

-CONTRIBUIÇÃO PARA O ARTIGO: Pesquisa nas bases de dados, elaboração textual, elaboração dos quadros, tabelas.

² Manuela Bandeira

Graduanda no curso de Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Pelotas. Atualmente bolsista pelo CNPq no Laboratório de Segurança e Ergonomia (LABSERG) atuando em pesquisas nas áreas de Ergonomia e Segurança no Trabalho. 96080-730 Pelotas. E-MAIL: manubandeiraa@gmail.com. Nº ORCID: 0009-0001-7817-1788

-CONTRIBUIÇÃO PARA O ARTIGO: Formatação do artigo nas normas da revista, contribuição textual.

³ Luis Franz

Graduado em Engenharia Civil pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (2001), Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2003) e doutorado em co-tutela em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil) e pela Universidade do Minho (Portugal) (2009). 96077-200 Pelotas. E-MAIL: luisfranz@gmail.com. Nº ORCID: 0000-0002-3257-7096

-CONTRIBUIÇÃO PARA O ARTIGO: Orientação

⁴ Renata Bemvenuti

Professora do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas. Possui graduação em Engenharia de Alimentos, mestrado e doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos pela FURG, especialização em Gestão da Segurança de Alimentos pelo SENAC-RS, Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Católica de Pelotas e MBA em Engenharia de Produção pela USP. 96202-090 Rio Grande. E-MAIL: reheidtmann@yahoo.com.br. Nº ORCID: 0000-0003-4671-1011

-CONTRIBUIÇÃO PARA O ARTIGO: Orientação

⁵ Aline Pereira

Possui graduação em Engenharia de Produção Mecânica pela Universidade de Santa Cruz do Sul (2004), mestrado em Engenharia de Produção, com ênfase em Qualidade e Produtividade, pela Universidade Federal de Santa Maria (2006) e doutorado em Agronomia pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas (2019), ênfase na área de pesquisa de Engenharia Rural. 96090-790 Pelotas. E-MAIL PARA CORRESPONDÊNCIA DOS LEITORES: pereira.asp@gmail.com. Nº ORCID: 0000-0002-5998-9031

-CONTRIBUIÇÃO PARA O ARTIGO: Orientação



Resultados/discussão

Como resultado, identificou-se que os exoesqueletos se mostraram na literatura científica como uma alternativa recorrente para aplicações onde ocorrem manutenção intensiva de posturas desfavoráveis e movimentação de cargas. Entretanto, percebeu-se também que os altos custos inviabilizam a sua utilização.

Conclusão

Conclui-se que há escassez de estudos integrando Indústria 4.0, ergonomia e a indústria de grãos, confirmando a relevância do tema. Embora exoesqueletos sejam promissores, seu alto custo e análises complexas dificultam a aplicação, enquanto sensores vestíveis mostram-se mais viáveis. Assim, a ergonomia física surge como o domínio mais promissor para uso dessas tecnologias no contexto de armazenamento e beneficiamento de grãos.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia do trabalho, Ergonomia, Indústria 4.0, Beneficiamento de grãos, Revisão Sistemática da Literatura, Medicina do Trabalho, Segurança do Trabalho, Enfermagem do Trabalho.

ABSTRACT

Introduction

Industry 4.0 essentially embraces innovation, process integration, and the use of new technologies, with a focus on delivering high-quality products at affordable costs. Ergonomics is relevant in this context because, despite improvements brought by new technologies, conflicts between production and human factors persist, especially under financial and performance pressures. Meanwhile, although agribusiness plays a key role in the Brazilian economy, it does not appear to adopt the emerging technologies encompassed by Industry 4.0, particularly when considering ergonomics alongside the grain storage and processing sector.

Objective

This study aims to verify which emerging technologies contribute to ergonomic improvement actions in the grain storage and processing sector, based on a Systematic Literature Review (SLR).

Methodology

For this study, the PRISMA method was used, along with data organization and processing via spreadsheets and content analysis software. The PICO method was employed to help formulate the research questions addressed throughout the study.

Results/Discussion

The findings indicate that exoskeletons are repeatedly highlighted in the scientific literature as an alternative for tasks involving prolonged unfavorable postures and load handling. However, their high costs often render them infeasible.

Conclusion

It is concluded that there is a scarcity of studies integrating Industry 4.0, ergonomics, and the grain industry, confirming the relevance of this topic. Although exoskeletons are promising, their high cost and the need for complex analyses limit their application, whereas wearable sensors prove more viable. Thus, physical ergonomics emerges as the most promising area for employing these technologies in the context of grain storage and processing.

KEYWORDS: Work engineering, Ergonomics, Industry 4.0, Grain processing, Systematic Literature Review, Occupational Medicine, Occupational Safety, Occupational Nursing.

INTRODUÇÃO

As tecnologias emergentes, extensivamente difundidas como tecnologias da Indústria 4.0, representam uma revolução tecnológica que está a transformar profundamente a maneira como produzimos, interagimos e vivemos. A crescente necessidade de inovar e integrar os processos das empresas, oferecendo produtos de qualidade com custo acessível, somada às novas tecnologias que surgiram no decorrer do último século, culminaram recentemente naquilo que se considera a quarta revolução industrial, que é resumidamente citada na literatura pela expressão Indústria 4.0 (I4.0) (1).

As contribuições desta nos últimos dez anos, tornando-se um conceito adotado internacionalmente, concedendo ênfase à abordagem centrada no ser humano, simultaneamente à criação de valor baseada em dados, inovação e agilidade nos modelos de negócios (2).

Apesar dos lucros serem a parte mais atrativa no que respeita a negócios, o fator humano é uma das peças fundamentais numa organização, devendo existir um ambiente que permita obter o seu melhor desempenho,

ao mesmo tempo que a saúde e o conforto permanecem garantidos. A ergonomia consiste num elemento com ampla gama de conceitos e técnicas que norteiam ações para tornar viável tal cenário.

Conforme é possível verificar em um texto de Ilka Kuorinka, que remonta do início do presente século, o termo ergonomia, apesar de ser cunhado pelo naturalista Wojciech Jastrzebowski em meados da metade do século XIX, só emergiu como nome formal para ergonomia enquanto ciência na metade do século XX, referindo-se aos esforços para estudar e resolver os problemas operacionais e de *design* associados aos avanços tecnológicos daquele período (3). Por definição, o termo traduz-se no estudo do *lay-out* de equipamentos e espaços de trabalho, cujos principais focos eram anatomia, fisiologia, medicina, desenho, arquitetura e engenharia de iluminação (4).

É importante destacar que, mesmo no século XXI, as atividades relacionadas à agricultura são responsáveis por taxas de lesões de trabalho significativamente altas, conforme dados do Conselho Nacional de Segurança dos Estados Unidos (5). Em contrapartida, estudos que abordam questões relacionadas à ergonomia na indústria de grãos, mesmo mais de uma década depois, ainda são escassos (6) e, mais recentemente, os que incluem associações com as tecnologias típicas da Indústria 4.0 são ainda mais raros. Apesar de não tão consolidada, a relação das tecnologias emergentes com a ergonomia está gradualmente em processo de fortalecimento. A título de exemplo, pesquisas observam que outras áreas de estudo já evoluíram para uma relação mais próxima com as tecnologias emergentes, inclusive adotando a nomenclatura “*cyber*” como prefixo (7). Assim sendo, são enfatizadas as transformações no contexto industrial e ergonômico, indicando igualmente a necessidade de uma redefinição terminológica e é sugerido, portanto, a designação ‘*cyberergonomics*’ para caracterizar a ergonomia na era da Indústria 4.0. O termo é recente e ainda não é amplamente empregado, mas demonstra a crescente evolução na relação entre esses conceitos.

Para além dos pontos já elencados, importa discutir brevemente como as Unidades de Beneficiamento e Armazenagem de Grãos (UBAGs) se estão a posicionar perante a emergência e consolidação dos elementos da I4.0. A função das UBAGs é receber grãos colhidos das plantações, remover resíduos, secar, armazenar e preparar para a venda e transporte. Os grãos colhidos são levados a estes locais predominantemente por caminhões. Já nas unidades, cada veículo é pesado em balanças específicas e, logo após, é encaminhado para o setor de descarga, onde escoa o grão para a moagem (8). Transportadores helicoidais na base das estruturas de moagem direcionam os grãos para a área de classificação, na qual as máquinas que fazem parte deste processo possuem peneiras vibratórias, que separam os grãos da forma desejada. Então, o grão é encaminhado para silos de pequena capacidade, onde elevadores o encaminham para a secagem. Por fim, após a secagem, ele é escoado para os silos, onde ficam armazenados até a venda. Apesar de haver variações neste processo, dependendo do tipo de grão e dos contratos estabelecidos entre as partes interessadas, as etapas indicadas acima não mudam significativamente.

Mesmo com a importância clara dos temas apresentados acima, percebe-se na literatura uma lacuna que consiste na ausência de estudos que tratam ao mesmo tempo os temas Indústria 4.0, ergonomia e a indústria de grãos. Portanto, um estudo como o que se propõe neste trabalho poderia contribuir para colocar a descoberto, ainda que parcialmente, esta área de conhecimento.

Tendo em conta o que foi exposto, o objetivo deste trabalho é verificar quais são as contribuições das tecnologias emergentes aplicáveis a ações de melhoria em ergonomia no setor de armazenagem e beneficiamento de grãos.

METODOLOGIA

Este estudo é classificado como uma pesquisa qualitativa de natureza básica, sendo, quanto aos objetivos, uma pesquisa exploratória e explicativa (9). Para realizar o estudo, foi utilizado o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (10), que propõe um conjunto de diretrizes para a realização de revisões sistemáticas e meta-análises de estudos de pesquisa. Para a sua aplicação, empregou-se a plataforma Parsifal, uma ferramenta *online* projetada para auxiliar os pesquisadores na condução de revisões sistemáticas da literatura (11).

Além disso, foi utilizado o método PICO, definido por **P** (População): referente a publicações relatando o uso de tecnologias emergentes aplicadas à ergonomia na indústria; **I** (Fenômeno de interesse): coletar evidências relacionadas às contribuições do uso de tecnologias emergentes aplicáveis à ergonomia; **Co** (Contexto): indústria de beneficiamento e armazenagem de grãos.

Questão de pesquisa

Após a constatação da lacuna de pesquisa, foram traçados os objetivos que nortearam a realização da revisão. Estes objetivos estão associados a três questões de pesquisa, as quais foram elaboradas e adicionadas na plataforma Parsifal, tendo contribuído para nortear todo o processo de investigação.

- Quais as contribuições que as tecnologias emergentes sugeridas ou aplicadas podem trazer para a ergonomia?
- Qual a integração de tecnologias emergentes e os aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia?
- Quais as possíveis contribuições para as UBAGs?

Estratégia de pesquisa nas bases de documentos

A estratégia de busca do estudo baseou-se em encontrar documentos que apresentassem o uso de tecnologias emergentes aplicáveis à ergonomia, para posteriormente efetuar a relação entre a tecnologia e sua utilização nas UBAGs.

As bases de dados escolhidas foram a *Scopus* e a *Web of Science* (WoS), que são as mais comumente utilizadas e confiáveis para publicações científicas (12). O descritor de busca (também denominado *string*) foi construído com foco nos temas centrais dos fenômenos sob investigação.

Foram realizados testes prévios nas bibliotecas digitais utilizando os termos de possível relevância para o tema, assim como combinações entre eles e os campos dos documentos em que deveriam constar, sendo eles o título, o resumo e as palavras-chave. Os termos que não agregaram à pesquisa (retornaram documentos fora do tema ou nenhum documento) foram excluídos. Desta forma, obteve-se como *string* de busca a seguinte expressão:

("turnover" OR "musculoskeletal disease" OR "musculoskeletal injury" OR "awkward posture" OR "physical fatigue" OR "mental fatigue" OR "load handling" OR "handling load") AND ("4.0" OR "smart manufacturing" OR "digital transformation" OR "internet of things" OR "artificial intelligence" OR "AI" OR "cyber-physical" OR "robotics" OR "augmented reality" OR "virtual reality" OR "additive manufacturing") AND ("manufacturing")

Na *string* acima, o operador lógico pode ser dividido em três blocos que estão entre parênteses, sendo que o primeiro abrange termos de maior relevância na ergonomia. O segundo bloco refere-se às principais tecnologias emergentes presentes no cenário industrial. A proposta inicial do terceiro bloco era de restringir

os documentos à área da indústria de grãos, entretanto, como não houve nenhum retorno de documentos, o termo “*manufacturing*” foi a melhor solução encontrada para a pesquisa ao domínio das indústrias.

Previamente à importação para análise dos documentos, foram utilizados alguns filtros diretamente nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Sendo eles documentos de 2013 a 2023, artigos e artigos de conferência. Os artigos de conferência foram incluídos devido ao tema ser recente. Consequentemente, revisões, livros, relatórios e outros não constaram nos documentos importados para análise.

Critérios de inclusão e exclusão

As tecnologias citadas nos documentos deveriam ter relação com a ergonomia e uma possível aplicação na unidade de beneficiamento e armazenagem de grãos. Assim, em associação a outros filtros de relevância, os critérios utilizados foram:

Critérios de inclusão: (i) Há relação de tecnologias emergentes com aspectos abrangidos na ergonomia.

Critérios de exclusão: (i) Estudos claramente irrelevantes, considerando os problemas da pesquisa; (ii) estudos duplicados; (iii) não estar na língua inglesa.

Avaliação de qualidade

Existem na literatura diversos modelos de avaliação de qualidade do documento, procurando cada um adequar-se ao tipo de análise executada na revisão. A forma mais comum é através das listas de verificação. Para o presente estudo, foram formuladas três perguntas, conforme a Tabela 1, com três possíveis respostas. A resposta “sim” resulta em 1 ponto, “parcialmente” em 0,5 e “não” em 0. O ponto de corte estipulado foi maior ou igual a 1. Os documentos excluídos nesta etapa apresentavam títulos e resumos presumivelmente válidos para o tema da RSL, entretanto, após leitura completa, mostraram não atingir os requisitos necessários.

A Figura 1 demonstra a aplicação das etapas anteriores até a seleção final dos documentos selecionados para extração dos dados. Após a aplicação da avaliação de qualidade, oito documentos foram recusados e, portanto, 16 foram levados para a etapa de extração e leitura aprofundada dos conteúdos.

RESULTADOS

Após aplicação das etapas discriminadas na Figura 1, foram selecionados 16 documentos para análise e discussão dos conteúdos, os quais são apresentados na Tabela 2.

Breve análise bibliométrica dos documentos obtidos

A bibliometria permite verificar a evolução do conhecimento em um determinado assunto, gerando dados que podem ser facilmente interpretados. A análise do conteúdo dos documentos permite uma compreensão mais aprofundada do tema, identificando, por exemplo, tendências e desafios (13).

No gráfico da Figura 2, é possível observar o ano de publicação dos 92 documentos obtidos na etapa de triagem, com as duplicatas já removidas, para conhecer a evolução da produção científica relativa ao tema.

Até 2019, o tema aparenta ter sido pouco estudado, com uma ascendência de publicações começando em 2020 e continuando em alta até 2022. As publicações de 2023 vão de janeiro até julho, mês em que foram importados os documentos para análise, mas aparenta uma tendência de crescimento na quantidade de

publicações. De forma geral, o número de documentos relevantes para o estudo manteve-se relativamente proporcional às publicações totais daquele ano.

Na Figura 3 apresenta-se uma nuvem de palavras onde o tamanho da fonte é proporcional às ocorrências do termo nas palavras-chave utilizadas pelos autores.

Percebe-se que as palavras-chave representam bem os documentos lidos. “*Manufacturing*” é o termo mais presente, pois foi uma restrição utilizada na *string* de busca. Além disso, “*Ergonomics*” está presente em todos os documentos lidos, e “*fatigue*” representa um dos fatores da ergonomia mais presentes nos estudos. “*Exoskeleton*” e “*wearable*” (*wearable sensor*) são as tecnologias emergentes com maior aparição. Destaque para “EMG” que foi uma ferramenta frequente para a colheita de dados, e “RULA” que foi um método bastante utilizado nas avaliações ergonômicas no contexto dos artigos.

Contribuições que tecnologias emergentes sugeridas ou aplicadas no documento lido podem trazer para a ergonomia

No caso particular da presente seção, tenta-se responder à questão de pesquisa: ‘quais as contribuições que as tecnologias emergentes sugeridas ou aplicadas podem trazer para a ergonomia?’. A primeira tecnologia emergente que merece atenção é o uso de exoesqueletos. Mesmo com as melhorias promovidas pela implementação da automação nas indústrias, problemas como manipulação de cargas pesadas e movimentos perigosos são difíceis de serem eliminados completamente. Como tal, os exoesqueletos apresentam-se como uma forma de abrandar (ou anular) essas adversidades (14).

Iranzo e colaboradores (15) apontam que o setor automotivo desponta no uso do exoesqueleto, sendo o único que apresenta um estudo publicado com aplicação dentro da indústria. Este estudo utilizou um exoesqueleto passivo para membros superiores, demonstrando, através de eletromiografia e de avaliação subjetiva, uma redução na utilização dos músculos envolvidos, principalmente o deltoide. Os autores interpretam isso como uma possível redução de fadiga e desconforto, mas não necessariamente enquanto estratégia que previne lesões; além disso, os usuários do exoesqueleto destacaram uma redução na mobilidade e dor leve em pontos de contato do corpo com o “exo”.

Já no estudo de Paterna e colaboradores (16) é apresentado o desenvolvimento de um exoesqueleto passivo para membros superiores, através de músculos pneumáticos artificiais, que promovem maior flexibilidade dos membros, fazendo um contraste com o estudo anteriormente citado de Iranzo e colaboradores (15). Apesar disso, esse “exo” carece de aplicação prática para avaliar seu desempenho.

O trabalho apresentando por Rusu e autores (14) propõe a integração de um exoesqueleto para membros superiores, já empregado pela Toyota, com a tecnologia de gêmeos digitais. O objetivo é permitir a realização de testes em diferentes ambientes, simulados virtualmente pelo gêmeo digital, utilizando o exoesqueleto. Isso implicaria em redução de custos e uma análise ergonômica que o aplicativo do gêmeo digital realiza, aplicando ferramentas da área. O estudo aplicou o modelo apenas em ambiente controlado.

Um conceito de sensor e controle de exoesqueleto é proposto por Stelzer e colaboradores (17), com o objetivo de ajudar em tarefas de manuseio manual de cargas de forma barata e com interface intuitiva. O exoesqueleto estudado é um braço robótico com sensores de torque, de baixo custo, na região do antebraço. Os autores destacam que é apenas um modelo que está a ser desenvolvido, mas com potencial relevante para aplicação na indústria.

Noutro trabalho, proposto por Govaerts e autores (18), analisam o impacto de um exoesqueleto passivo para a região dorsal na fadiga mental do usuário. Dentro do ambiente e situação estudados, o tempo até o usuário do exoesqueleto alcançar a fadiga mental foi o mesmo do participante sem o exoesqueleto. Além disso, no estado de fadiga mental, o usuário do exoesqueleto apresentou maior dificuldade em realizar os movimentos. Os autores destacam um possível viés da sequência de movimentos utilizado no estudo, e ressaltam a necessidade de mais estudos na área.

Percebe-se que os exoesqueletos, são majoritariamente passivos e aplicáveis aos membros superiores. As razões disso são questões de praticidade e redução de custo expostas no estudo de Paterna e colaboradores. (16).

Hefferle e colaboradores (19), propõem uma padronização nas técnicas de avaliação ergonômica para exoesqueletos, através de técnicas objetivas e subjetivas. A maioria dos estudos anteriores determinou a obtenção de ganhos através da eletromiografia (EMG) nos grupos musculares aumentados ou outros grupos musculares distintos (por exemplo, músculos antagonistas). A seleção de grupos musculares específicos para medir são inerentemente tendenciosas. Portanto, uma abordagem holística, que inclui uma técnica de medição subjetiva e três objetivas, é proposta. É desenvolvido um projeto experimental que permite a implantação das técnicas de medição acima mencionadas com uma configuração adequada.

Outra tecnologia emergente e bastante frequente nos documentos recolhidos refere-se aos sensores vestíveis, os quais são discutidos a seguir. De forma geral, os estudos que utilizam sensores vestíveis têm como objetivo a monitorização em tempo real da situação do trabalhador. Manan e colaboradores (20) destacam que o uso de sensores vestíveis para monitoramento de fadiga em tempo real pode prevenir lesões de trabalho induzidas pela fadiga.

Através de estudos de casos, identifica-se que o uso destes em conjunto com mecanismos de análise de dados permite a identificação prévia da fadiga em tempo real, sendo necessário, nas atividades estudadas, a utilização de apenas um sensor, evidenciado no estudo de Maman e colaboradores (21).

Outro estudo, de Baghdadi e colaboradores (22), propõe a utilização de um sensor de movimento inercial no tornozelo do trabalhador para identificação da fadiga, através do padrão de caminhada. Por meio da tecnologia de aprendizagem de máquina, foram identificados padrões, principalmente a aceleração e duração do passo, que denotavam o estado de fadiga do trabalhador. Destaca-se que para a avaliação da fadiga foram utilizados métodos subjetivos. Segundo os autores, o estudo fornece um método de classificação robusto para ser aplicado a testes futuros num ambiente de fabricação real e em condições que abordam essas mesmas questões.

No estudo de Vignais e colaboradores (23), o trabalhador veste sensores de medição inercial combinados com um *software* de realidade aumentada que reproduz os movimentos do trabalhador, e, baseado na escala do método RULA, emite um aviso sonoro quando o trabalhador está em posição de risco atendendo ao do ponto de vista ergonômico, assim como sinaliza em vermelho essa região do corpo tornando o dado acessível à observação do trabalhador, para assim induzir à mudança de postura.

Scheuermann e colaboradores (24), apresentam o uso de uma luva inteligente, que faz o papel de *scanner* de códigos de barras e permite que o trabalhador utilize as duas mãos livres para executar a tarefa, normalmente relacionado a movimentar e posicionar suprimentos. Na prática, traz apenas um leve conforto para as mãos e permite realizar a tarefa executando menos movimentos.

Uma estrutura analítica que possibilita entender as necessidades físicas de determinadas tarefas, assim como as condições de cada trabalhador, para fazer o escalonamento e rotações de trabalho corretas é proposta na pesquisa de Berti e colaboradores (25). Os sensores vestíveis de forma isolada não possuem nenhuma utilidade, sendo necessária a interpretação dos dados fornecidos pelos sensores. Desta forma, costumam vir associados à outra tecnologia emergente, normalmente a inteligência artificial, através de redes neurais e aprendizagem de máquina, e também à realidade aumentada.

É possível encontrar ainda outras tecnologias emergentes, e que merecem uma breve discussão. Noutro trabalho, proposto por Colim e colaboradores (26), os autores implementam um braço robótico (robô colaborativo) que auxilia os trabalhadores que executam funções numa estação de empacotamento. Foram observadas melhorias ergonômicas, principalmente no movimento de torção de tronco.

A inteligência artificial é predominantemente utilizada como fator de predição. Os autores Domocos e Baracscai (27) aplicam como forma de prever a intenção de *turnover* dos trabalhadores e o estudo de Lambay e colaboradores (28) propõem um modelo de previsão de fadiga física baseada em redes neurais recorrentes. A implementação e os benefícios da utilização de sistemas ciber-físicos em diversos fatores da ergonomia são propostos em Yutong e colaboradores (29), enquanto Alkan e colaboradores (30) exploram a realidade virtual na indústria, através de um modelo que permite que o *design* da linha de montagem seja feito de forma virtual. Algumas dessas tecnologias, principalmente realidade aumentada e inteligência artificial, possuem utilização também de forma complementar em estudos com sensores vestíveis (21) (22) (23).

Integração de tecnologias emergentes e os aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia

Nesta seção pretende-se perceber qual é a integração de tecnologias emergentes e os aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia.

As tecnologias emergentes são o exoesqueleto, sensores vestíveis, inteligência artificial, realidade aumentada, realidade virtual, robôs colaborativos e sistemas ciber-físicos. Os aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia, por sua vez, são o *turnover*, doenças ou lesões musculoesqueléticas, fadiga física e mental, manuseio de cargas pesadas e posturas desfavoráveis.

É pertinente ressaltar que alguns estudos englobam a utilização de mais de uma tecnologia na sua abordagem, assim como a intervenção em mais de um aspecto da ergonomia. Essas relações são apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5. Além disso, deve ser enfatizado que o cenário apresentado nestas ilustrações considera as tecnologias emergentes e os aspectos da ergonomia dentro do contexto das UBAGs. Analisando a Tabela 4 constata-se que um dos aspectos mais relevantes da ergonomia- a fadiga física, figura em sete estudos, seguida pelas doenças ou lesões musculoesqueléticas e posturas desfavoráveis, com seis ocorrências cada, ao passo que o manuseio de cargas pesadas é abordado em três contextos distintos. Por último, importa mencionar que o índice de rotatividade de pessoal (*turnover*) e a fadiga mental recebem tratamento individualizado, cada um destes fenômenos num estudo distinto.

Na Tabela 5, observa-se que as tecnologias emergentes mais prevalentes para as ações voltadas à ergonomia são os exoesqueletos e os sensores vestíveis, com um total de seis ocorrências cada. Em sequência, observa-se a presença da inteligência artificial em quatro documentos. As demais tecnologias, a saber, realidade virtual, realidade aumentada, robôs colaborativos e sistemas ciber-físicos, apresentam-se com uma única aparição cada.

A Tabela 6 relaciona em qual fator da ergonomia a tecnologia emergente utilizada no estudo impacta. A relação mais forte é percebida entre os exoesqueletos e as doenças/lesões musculoesqueléticas, com quatro aparições, assim como no manuseio de cargas pesadas, com três. Já os sensores vestíveis denotam maior quantidade de intervenções em situações de fadiga física, abordada em três estudos.

Além disso, cabe destacar que no documento de Santos e colaboradores (31), os autores abordam que a realidade virtual é de suma importância para transformar o ensino e treinamento em ambientes complexos e perigosos, tornando-os mais interativos, didáticos e seguros, o que pode reduzir erros, acelerar a aprendizagem e aumentar a motivação dos usuários, promovendo assim benefícios à saúde ocupacional, inclusive auxiliando na reabilitação de lesões musculoesqueléticas.

Discussão quanto às informações colhidas e análise de possíveis contribuições para as UBAGs

Neste ponto, pretende-se responder sobre as possíveis contribuições para as UBAGs, com base nas informações coletadas e como elas podem ser analisadas. Os exoesqueletos se destacam quantitativamente, aparecendo em seis documentos, mas são recursos caros, que exigem treinamento e têm aplicações limitadas a processos específicos e estáticos, normalmente atividades que demandam que o trabalhador utilize as mãos acima da cabeça. Considerando que as tarefas nas UBAGs costumam exigir movimentação constante, a utilidade dos exoesqueletos torna-se duvidosa. Dessa forma, a quantidade de estudos sobre o tema não é suficiente para avaliar a aplicabilidade da tecnologia, sendo necessário considerar diversos outros fatores.

Por outro lado, os sensores vestíveis aparecem em seis estudos, com um deles de forma secundária, e sua aplicação nas UBAGs mostra-se mais pertinente e viável. O custo relativamente baixo desses dispositivos e a sua simplicidade, comparados a uma pulseira, tornam sua utilização menos incômoda para o trabalhador. A bibliografia indica que, para a detecção de fadiga física, um único sensor pode ser suficiente. Embora Vignais e colaboradores (23) tenham empregado múltiplos sensores, combinados com realidade aumentada; o trabalho datado de 2013 é considerado atualmente menos relevante, pois uma câmera pode oferecer a mesma função de maneira mais econômica e confortável, ilustrando a rápida evolução das tecnologias emergentes.

Alguns estudos propõem estruturas para avaliação ergonômica utilizando tecnologias emergentes, como os trabalhos de Maman (21), Berti (25) e Hefferle e respectivos colaboradores (19). Muitos desses artigos utilizam métodos subjetivos para a avaliação ergonômica, geralmente por questões econômicas, mas os autores sugerem que a utilização da eletromiografia (EMG) poderia proporcionar maior confiabilidade. De fato, outros estudos, como o de Rusu e colaboradores (14), já a aplicaram, evidenciado pela recorrência da sigla nos documentos. Entretanto, Hefferle e colaboradores (19) afirmam que a maioria dos estudos anteriores concentrou as medições de EMG em grupos musculares específicos, o que pode gerar uma seleção tendenciosa, para tanto, eles propõem uma abordagem mais abrangente, que combine medições subjetivas com três técnicas objetivas, inicialmente para exoesqueletos, mas adaptáveis a outras tecnologias.

Entre os documentos mais relevantes para as UBAGs, destacam-se os trabalhos de Alkan (30), Baghdadi e colaboradores (22), Maman (21), Lambay (28) e Berti e colaboradores, respectivamente (25). Baghdadi e co-autores (22) apresentam um método prático e eficiente para detectar a fadiga física em tarefas de manuseio manual, comuns em processos de armazenamento e expedição. Para aplicar essa tecnologia, seria

necessário adquirir um sensor inercial, ter acesso ao modelo de aprendizagem de máquina utilizado na detecção da fadiga e desenvolver um sistema de intervenção que alerte o trabalhador, prevenindo lesões decorrentes da fadiga. Lambay e colaboradores (28) utilizaram uma rede neural recorrente para prever a fadiga física, combinando dados de sensores de inércia e frequência cardíaca com informações pessoais e a escala de Borg, método subjetivo de avaliação de esforço. Embora essa abordagem demande mais sensores e se mostre menos eficiente do que a proposta de Baghdadi e colaboradores (22), ela pode ser uma alternativa para tarefas que alterem a cinemática da caminhada. O modelo proposto por Alkan e co-autores (30) integra informações sobre a obra para possibilitar o *design* virtual de linhas de montagem, utilizando um manequim virtual (*V-Man*) acoplado a módulos de avaliação postural e de fadiga, os quais sinalizam a viabilidade ergonômica do *layout* e evitam lesões e custos de *re-design*. Já o estudo de Berti e colaboradores (25) propõe uma estrutura metodológica para avaliar as limitações físicas de cada trabalhador e ajustar as escalas de rodízio de acordo com as restrições impostas, prevenindo deficiências e distúrbios musculoesqueléticos, embora enfrente desafios na coleta de dados em campo e no tratamento individualizado. Por fim, Maman e colaboradores (21) desenvolvem uma estrutura analítica para o gerenciamento da fadiga com sensores vestíveis, concluindo que um único sensor inercial é capaz de identificar a fadiga localizada em ambientes controlados, embora seja necessária a validação por meio de estudos de campo em indústrias como as UBAGs, o que poderia posicioná-las como pioneiras no uso dessa tecnologia.

De maneira abrangente, os dispositivos de sensores vestíveis, combinados com inteligência artificial, emergem como as tecnologias mais promissoras para as UBAGs, devido ao baixo custo e à facilidade de implementação, sem que seja necessário alterar o espaço físico.

CONCLUSÃO

Quando se iniciou o trabalho de pesquisa, constatou-se que havia uma lacuna na literatura que se refere à ausência de estudos que abranjam ao mesmo tempo os temas Indústria 4.0, ergonomia e a indústria de grãos, sendo este fato, por si só, uma constatação relevante a ser destacada. Assim sendo, a pesquisa proposta por este trabalho teria a capacidade de oferecer uma contribuição para preencher essa lacuna no campo do conhecimento.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo identificar, através da pesquisa em documentos presentes na literatura, quais as tecnologias emergentes que são utilizadas para ações em ergonomia aplicáveis na unidade de armazenagem e beneficiamento de grãos. Constatou-se que há um claro crescimento na produção de pesquisas envolvendo as tecnologias emergentes, especialmente a partir de 2020, quando houve significativo aumento no número de publicações. Uma breve análise às palavras-chave utilizadas pelos autores mostra um foco predominantemente nas tecnologias que envolvem exoesqueletos e *wearables* ou sensores vestíveis, seguido pelas abordagens em IoT. Portanto, dos tópicos frequentemente atribuídos à Indústria 4.0, aparentemente, há uma certa discrepância no foco com as pesquisas que vêm sendo focadas. Decorre disso o fato de que provavelmente a Ergonomia Física é o domínio que mais tem ganho atenção no que concerne às tecnologias emergentes.

Mais especificamente no que compete à possibilidade de aplicação destes conceitos no contexto da unidade de armazenagem e beneficiamento de grãos, os resultados apontam para a oportunidade de aplicação de alguns recursos. Neste sentido, os exoesqueletos mostram-se como uma boa alternativa para aplicações onde ocorrem manutenção intensiva de posturas desfavoráveis e movimentação de cargas. Em contrapartida

sua aplicação é claramente inviabilizada pelos possíveis custos envolvidos, bem como a avaliação de seus resultados é fragilizada pela necessidade de uso de técnicas de análise complexas, como é o caso da EMG. Dispositivos como os sensores vestíveis se mostraram como os mais atrativos dentre as tecnologias abrangidas nos estudos identificáveis, pois sua aplicação e custo são significativamente menores.

CONFLITOS INTERESSE, QUESTÕES ÉTICAS/LEGAIS

Nada a declarar.

AGRADECIMENTOS

Nada a declarar

BIBLIOGRAFIA

- 1) Almeida P. Indústria 4.0: Princípios básicos, aplicabilidade e implantação na área industrial. 1 ed. São Paulo: Erica. 2019.
- 2) Kagermann H, Wahlster W. Ten Years of Industrie 4.0. Science. 2022; 4(3): 1-26. DOI: 10.3390/sci4030026.
- 3) Kuorinka I. History of the International Ergonomics Association: The First Quarter of a Century. The IEA Gets Organised: the General Assembly as Governing Body, 1961-1976. Ergonomics International. 2000.
- 4) Bridger R. Introduction to Human Factors and Ergonomics. 4. edição. Boca Raton: CRC Press. 2017.
- 5) Douphrate D, Rosecrance J, Wahl G. Workers' compensation experience of Colorado agriculture workers, 2000–2004. American Journal of Industrial Medicine. 2006; 49(11): 900–910. DOI: 10.1002/ajim.20387.
- 6) Kakhki F, Freeman S, Mosher G. Use of Neural Networks to Identify Safety Prevention Priorities in Agro-Manufacturing Operations within Commercial Grain Elevators. Applied Sciences. 2019; 9(21). DOI: <https://doi.org/10.3390/app9214690>.
- 7) Pouyakian M. Cybergonomics: Proposing and justification of a new name for the ergonomics of Industry 4.0 technologies. Frontiers in Public Health. 2022; 10 (1). DOI: 10.3389/fpubh.2022.1012985.
- 8) Müller E e Franz L. Um estudo sobre a proteção de máquinas e equipamentos em uma unidade de beneficiamento de grãos. In: XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba. 2014.
- 9) Gil A. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas. 2022.
- 10) Page M, McKenzie J, Bossuyt P, Boutron I, Hoffmann T, Mulrow C *et al.*, The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. British Medical Journal. 2021; 372(71). DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- 11) Kitchenham B. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering, Version 2.3. EBSE Technical Report. 2007.
- 12) Modak N, Sinha S, Raj A, Panda S, Merigó J, Jabbour A. Corporate social responsibility and supply chain management: Framing and pushing forward the debate. Journal of Cleaner Production. 2020; 273 (1). DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122981.
- 13) Seuring S, Gold S. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. Supply Chain Manag. 2012; 17(5): 544–555. DOI: <https://doi.org/10.1108/13598541211258609>.

- 14) Rusu C, Constantinescu C, Marinescu S. A generic hybrid Human/Exoskeleton Digital Model towards Digital Transformation of Exoskeletons-integrated workplaces. *Procedia CIRP*. 2021; 104(1): 1787–1790. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.301.
- 15) Iranzo S, Piedrabuena A, Iordanov D, Iranzo-Martinez U, Lois-Belda J. Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. *Applied Ergonomics*. 2020; 87 (1). DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103120.
- 16) Paterna M, Magnetti S, Benedictis C, Muscolo G, Ferraresi C. A passive upper-limb exoskeleton for industrial application based on pneumatic artificial muscles. *Mechanical Sciences*. 2022; 13(1): 387–398, DOI: 10.5194/ms-13-387-2022.
- 17) Stelzer P, Otten B, Kraus W, Pott A. Sensor and Control Concept for a Wearable Robot for Manual Load Handling Assistance. *New Trends in medical and Service Robots*. 2018; 48 (1): 87–100. DOI: 10.1007/978-3-319-59972-4_7.
- 18) Govaerts R, Bock S, Stas L, Makrini I, Habay J, Cutsem J et al. Work performance in industry: The impact of mental fatigue and a passive back exoskeleton on work efficiency. *Applied Ergonomics*. 2023; 110 (1). DOI: 10.1016/j.apergo.2023.104026.
- 19) Hefferle M, Lechner M, Kluth K, Christian M. Development of a Standardized Ergonomic Assessment Methodology for Exoskeletons Using Both Subjective and Objective Measurement Techniques. *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*. 2020; 962 (1): 49–59. DOI: 10.1007/978-3-030-20467-9_5.
- 20) Maman Z, Baghdadi A, Megahed F e Cavuoto L. Monitoring and Change Point Estimation of Normal (In-Control) and Fatigued (Out-of-Control) State in Workers. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2016-60487>.
- 21) Maman Z, Chen Y, Baghdadi A, Lombardo S, Cavuoto L e Megahed F. A data analytic framework for physical fatigue management using wearablesensors. *Expert Systems With Applications*. 2020; 155 (20). DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113405.
- 22) Baghdadi A, Megahed F, Esfahani E e Cavuoto L. A machine learning approach to detect changes in gait parameters following a fatiguing occupational task. *Ergonomics*. 2018; 61 (8): 1116–1129. DOI: 10.1080/00140139.2018.1442936.
- 23) Vignais N, Miezal M, Bleser G, Mura K, Gorecky D e Marin F. Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. *Applied Ergonomics*. 2013; 44 (4): 566–574. DOI: 10.1016/j.apergo.2012.11.008.
- 24) Scheuermann CS, Strobel M, Bruegge B, Verclas S. Increasing the Support to Humans in Factory Environments Using a Smart Glove: An Evaluation. *IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress*. 2016. Toulouse, France. DOI: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCom-IoP-SmartWorld.2016.0134.
- 25) Berti N, Finco S e Battini D. A new methodological framework to schedule job assignments by considering human factors and workers' individual needs. *26th Summer School Francesco Turco*. 2021.

- 26) Colim A, Sousa N, Carneira P, Costa N, Arezes P, Cardoso A. Ergonomic intervention on a packing workstation with robotic aid—case study at a furniture manufacturing industry. *Work*. 2020; 66 (1): 229–237. DOI: 10.3233/WOR-203144.
- 27) Domokos B, Baracska Z. Action and Reaction: Mapping of Behavioral Patterns. *Montenegrin Journal of Economics*. 2022; 18(1): 31–46. DOI: 10.14254/1800-5845/2022.18-1.3.
- 28) Lambay A, Liu Y, Morgan P, Ji Z. A Data-Driven Fatigue Prediction using Recurrent Neural Networks. In: 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). 2021. DOI: 10.1109/HORA52670.2021.9461377.
- 29) Yutong W, Wang J, Tian Y, Wang X. Digital Workers in Cyber–Physical–Social Systems for PCB Manufacturing. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. 2022; 6(1): 688–692. DOI: 10.1109/JRFID.2022.3212782.
- 30) Alkan B, Vera D, Ahmad M, Harrison R. A Lightweight Approach for Human Factor Assessment in Virtual Assembly Designs: An Evaluation Model for Postural Risk and Metabolic Workload. *Procedia CIRP*. 2016; 44 (1): 26–31. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.115.
- 31) Santos M, Almeida A, Chagas D. Realidade Virtual aplicada à Saúde e Segurança Ocupacionais. *Revista Portuguesa de Saúde Ocupacional online*. 2024; 18: esub0465. DOI: 10.31252/RPSO.21.09.2024.

Tabela 1 - Questões de pesquisa

QUESTÕES
O estudo apresenta boa qualidade no que concerne às contribuições que tecnologias emergentes sugeridas ou aplicadas no documento lido podem trazer para a ergonomia?
O estudo aumenta significativamente o conhecimento sobre integração de tecnologias emergentes e os aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia?
O estudo apresenta boa qualidade no que compete à apresentação entre as tecnologias sugeridas ou aplicadas algum indício de aplicações consistentes para as UBAGs?

Figura 1 - Etapas da revisão sistemática

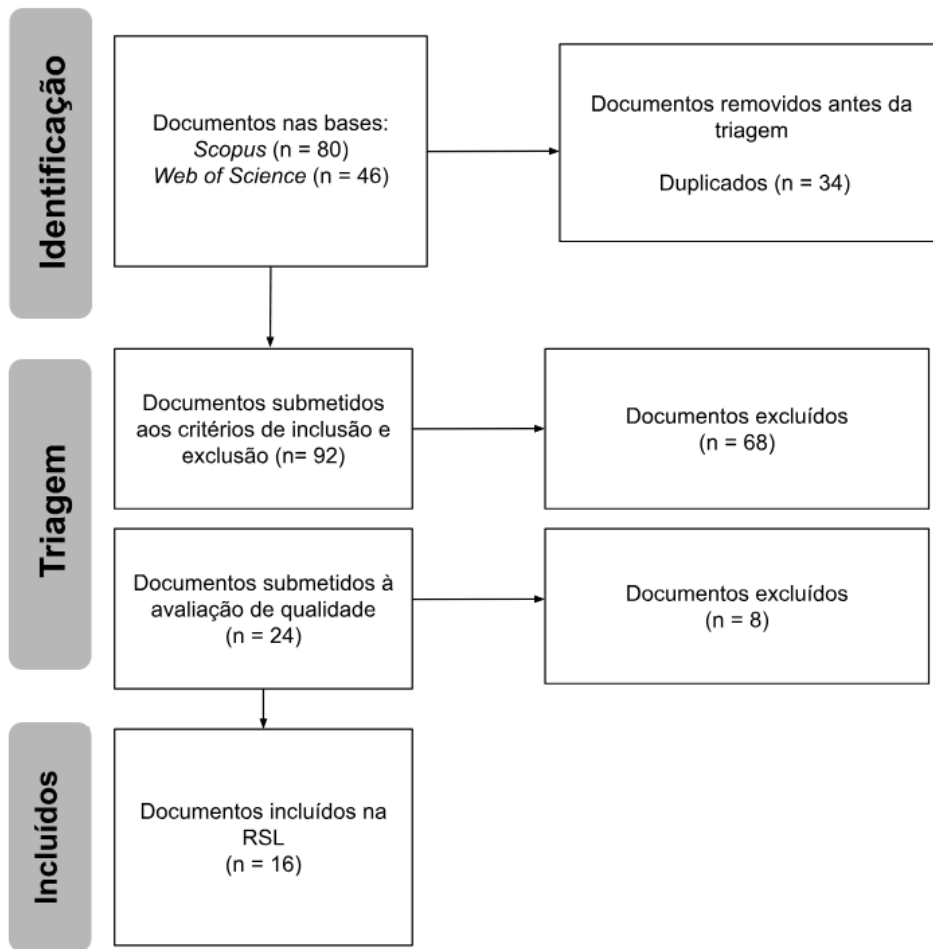


Tabela 2 - Documentos selecionados para análise e discussão

ARTIGO	AUTORES	ANO
<i>A data analytic framework for physical fatigue management using wearablesensors</i>	Maman, Z.S.; Chen, Y.; Baghdadi, A.; Lombardo, S.; Cavuoto, L.A.; Megahed, F.M.	2020
<i>A Data-Driven Fatigue Prediction using Recurrent Neural Networks</i>	Lambay, A.; Liu, Y.; Morgan, P.; Ji, Z.	2021
<i>A generic hybrid Human/Exoskeleton Digital Model towards Digital Transformation of Exoskeletons-integrated workplaces</i>	Rusu, C. A.; Constantinescu, C.; Marinescu, S.C.	2021
<i>A Lightweight Approach for Human Factor Assessment in Virtual Assembly Designs: An Evaluation Model for Postural Risk and Metabolic Workload</i>	Alkan, B.; Vera, D.; Ahmad, M.; Ahmad, B.; Harrison, R.	2016
<i>A machine learning approach to detect changes in gait parameters following a fatiguing occupational task</i>	Baghdadi, A.; Megahed, F. M.; Esfahani, E. T.; Cavuoto, L. A.	2018
<i>A new methodological framework to schedule job assignments by considering human factors and workers' individual needs</i>	Berti, N.; Finco, S.; Battini, D.	2021
<i>A passive upper-limb exoskeleton for industrial application based on pneumatic artificial muscles</i>	Paterna, M.; Magnetti, S. G.; Benedictis, C.; Muscolo, G. G.; Ferraresi, C.	2022
<i>Development of a Standardized Ergonomic Assessment Methodology for Exoskeletons Using Both Subjective and Objective Measurement Techniques</i>	Hefferle, M.; Lechner, M.; Kluth, K.; Christian, M.	2020
<i>Digital Workers in Cyber-Physical-Social Systems for PCB Manufacturing</i>	Wang, Y.; Wang, J.; Tian, Y.; Wang, X.; Wang, F. Y.	2022

Tabela 3 - Aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia presentes em cada documento

		Aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia					
		Turnover	Doença/lesão musculoesquelética	Fadiga física	Fadiga mental	Manuseio de cargas pesadas	Posturas desfavoráveis
DOCUMENTOS	1			1			
	2			1			
	3		1			1	
	4			1			1
	5			1			
	6		1	1			1
	7		1				
	8		1			1	1
	9			1			
	10		1				1
	11		1				1
	12			1			
	13						1
	14	1					
	15					1	
	16				1		
TOTAL		1	6	7	1	3	6

Tabela 4 - Tecnologias emergentes presentes em cada documento

		Tecnologias emergentes						
		Exoesqueleto	Sensores vestíveis	Inteligência artificial	Realidade aumentada	Realidade virtual	Robôs colaborativos	Sistemas ciber-físicos
DOCUMENTOS	1		1	1				
	2			1				
	3	1						1
	4					1		
	5		1	1				
	6		1					
	7	1						
	8	1						
	9							1
	10						1	
	11	1						
	12		1					
	13		1		1			
	14			1				
	15	1	1					
	16	1						
TOTAL		6	6	3	1	1	1	1

Tabela 5 - Aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia X tecnologias emergentes

Tecnologias emergentes	Aspectos mais relevantes relacionados à ergonomia					
	Turnover	Doença/lesão muscular esquelética	Fadiga física	Fadiga mental	Manuseio de cargas pesadas	Posturas desfavoráveis
Exoesqueleto		4	1	1	3	2
Sensores vestíveis		1	3		1	2
Inteligência artificial	1		2			
Realidade virtual			1			2
Realidade aumentada						
Robôs colaborativos		1				1
Sistemas ciber-físicos		1	1		1	

Data de receção: 2025/02/24

Data de aceitação: 2025/03/16