Sensores Vestíveis na Ergonomia Ocupacional: Uma Revisão Sistemática

Davi Avelino da Silva[1], Luiz Philipi Calegari [2], David Carneiro Molina[3]

[1]UFSC, Florianópolis, Brasil, (davi.avelino@gmail.com)
[2]UFSC, Florianópolis, Brasil.
[3]UFSC, Florianópolis, Brasil.

Resumo: Este estudo analisa o uso de dispositivos vestíveis e sensores na avaliação ergonômica ocupacional. Por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (PRISMA/Scopus), foram selecionados 66 artigos. Constatou-se o predomínio de Unidades de Medição Inercial (IMUs) e wearables integrados a métodos biomecânicos e inteligência artificial para análise postural contínua. As maiores aplicações estão na indústria e construção civil. O trabalho estrutura a área e propõe uma agenda para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Avaliação Ergonômica ; Ergonomia Ocupacional; Internet das Coisas; Unidades de Medição Inercial; Wearables.

INTRODUÇÃO

A preservação da saúde e integridade física dos trabalhadores no ambiente ocupacional constitui um desafio central para a gestão industrial moderna e para a ergonomia biomecânica. Dentre as principais patologias ocupacionais, os Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT) e as Lesões por Esforços Repetitivos (LER) figuram entre as maiores causas de absenteísmo, incapacidade laboral temporária ou permanente e custos previdenciários elevados em escala global (Yazdani et al., 2021). A mitigação desses riscos depende diretamente da capacidade de diagnosticar, em tempo útil, posturas inadequadas, repetições de ciclos sem pausa suficiente e sobrecargas biomecânicas no manuseio manual de cargas (Conforti et al., 2019; Matijevich et al., 2021).

Historicamente, a avaliação ergonômica nos locais de trabalho apoia-se em métodos de inspeção observacional direta e preenchimento manual de protocolos padronizados, a exemplo do *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA), *Rapid Entire Body Assessment* (REBA), *Strain Index* (SI) e a equação de levantamento do *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) (Caterino et al., 2021; Peppoloni et al., 2016). Embora consagrados, esses métodos observacionais tradicionais apresentam vulnerabilidades metodológicas bem documentadas: (a) subjetividade inerente à interpretação visual do ergonomista; (b) amostragem temporal restrita, que captura apenas momentos pontuais da jornada de trabalho; (c) efeito de Reatividade ou Hawthorne, no qual o trabalhador altera seu padrão postural ao perceber que está sendo observado; e (d) elevada demanda de tempo para compilação e processamento manual dos dados (Diego-Mas e Alcaide-Marzal, 2014; Stefana et al., 2021).

Com o advento da Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0) e a consolidação da Internet das Coisas (IoT), emergem novos paradigmas de monitoramento ocupacional pautados por Sistemas Ciber-Físicos (CPS) e sensores inteligentes (Raso et al., 2018). A integração de Unidades de Medição Inercial (IMUs), eletromiografia de superfície (sEMG), sensores de pressão plantar/palmar e sistemas de profundidade (visão computacional) permite a aquisição contínua, quantitativa e não invasiva de parâmetros cinemáticos e cinéticos do corpo humano durante a realização real das tarefas (Giannini et al., 2020; Lorenzini et al., 2022).

Apesar da proliferação de estudos experimentais reportando o uso dessas tecnologias em setores como manufatura (Maurice et al., 2019), construção civil (Antwi-Afari et al., 2020), cirurgia médica (Arrighi-Allisan et al., 2022) e forças armadas (Proud et al., 2022), observa-se uma fragmentação na literatura. Existem poucas revisões que articulam de maneira integrada a especificação dos componentes de hardware (sensores), os métodos ergonômicos automatizados e as técnicas computacionais de inteligência artificial empregadas para o processamento desses sinais biomecânicos. Diante dessa lacuna, este estudo estabelece a seguinte questão de pesquisa: *Qual é o estado da arte na literatura científica internacional sobre o uso de dispositivos tecnológicos instrumentados e técnicas computacionais*

para a avaliação ergonômica ocupacional, e quais são os eixos estratégicos para o avanço dessa área de conhecimento?

O presente trabalho tem como objetivo geral mapear, categorizar e analisar criticamente as evidências científicas referentes ao emprego de dispositivos tecnológicos e arquiteturas de sensoriamento na avaliação ergonômica ocupacional, propondo uma taxonomia integradora e uma agenda de pesquisa estruturada para balizar futuros desenvolvimentos na área.

MATERIAL E MÉTODOS

Para assegurar o rigor científico, a reprodutibilidade e a transparência na seleção e análise do acervo bibliográfico, esta pesquisa adotou o método de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) fundamentado no protocolo clássico de Software Engineering e Ciências Aplicadas de Kitchenham (2004), integrado às diretrizes internacionais do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Ayodele et al., 2020; Coldewey et al., 2022).

2.1 Protocolo de Busca e Estratégia de Filtragem

A coleta de dados foi realizada mediante consulta à base de dados **Scopus** (Elsevier), selecionada por sua alta cobertura de periódicos indexados de alto impacto nas áreas de Engenharia de Produção, Ergonomia, Robótica, Ciência da Computação e Saúde Ocupacional. A estratégia de busca foi desenhada a partir da combinação de dois blocos conceituais interligados pelo operador booleano `AND`, aplicando-se a busca restrita aos campos de Título, Resumo e Palavras-chave (*Article Title, Abstract, Keywords*).

O Quadro 1 descreve a formulação exata da string de busca utilizada para a recuperação dos documentos científicos primários.

Quadro 1: Configuração dos blocos de termos e lógica da string de busca na RSL

Bloco Tecnológico (Hardware/Sensoriamento)	Operador Booleano	Bloco de Aplicação (Ergonomia/Análise)
"wearable" OR "sensor*"	AND	"ergonomic*assessment" OR "ergonomic*analysis"

2.2 Critérios de Elegibilidade e Triagem PRISMA

A seleção dos estudos seguiu critérios objetivos pré-estabelecidos de inclusão (CI) e exclusão (CE):

- **CI1:** Trabalhos originais publicados em periódicos científicos revisados por pares ou anais de congressos de relevância consolidada;
- **CI2:** Documentos redigidos no idioma inglês;
- **CI3:** Estudos que apresentem a aplicação empírica, validação ou proposição de dispositivos físicos/tecnológicos direcionados explicitamente à avaliação ou monitoramento ergonômico de atividades ocupacionais.
- **CE1:** Artigos focados exclusivamente em reabilitação fisioterapêutica clínica, patologias ortopédicas sem correlação com trabalho ou esportes de alto rendimento;
- **CE2:** Estudos de revisão bibliográfica narrativa ou conceitual sem componente de validação experimental;
- **CE3:** Trabalhos sem disponibilidade de acesso ao texto integral ou publicados na forma de resumos expandidos sem rigor metodológico;
- **CE4:** Artigos que sofreram processo formal de retratação (*retracted papers*) pelas instâncias editoriais das revistas.

O processo sistemático de filtragem operou em quatro fases estruturadas:

1. **Identificação:** A busca inicial na base Scopus retornou um total de 143 registros. Não foram incluídos registros adicionais provenientes de outras fontes cinzentas de modo a manter a homogeneidade do acervo indexado.

2. **Triagem Inicial:** Da amostra de 143 trabalhos, 1 registro foi excluído por indisponibilidade completa do texto e 28 registros foram descartados após a leitura rápida por estarem fora do idioma inglês ou constituírem capítulos de livros/editoriais não aderentes aos critérios. Restaram 114 artigos para análise em profundidade.
3. **Elegibilidade:** Leitura na íntegra dos 114 artigos. Nesta etapa, 47 estudos foram eliminados por não apresentarem o escopo direto em ergonomia ocupacional (ex.: foco restrito a próteses ou biomecânica clínica). Adicionalmente, identificou-se o estudo de Ji e Piovesan (2020), o qual, por conter status oficial de retratação (*RETRACTED*) no periódico *International Journal of Industrial Ergonomics*, foi sumariamente excluído da amostragem em observância às boas práticas de integridade acadêmica.
4. **Inclusão:** A amostra final resultou em exatamente **66 artigos científicos altamente aderentes**, os quais foram fichados, categorizados e sintetizados na presente revisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução Temporal e Distribuição Geográfica da Produção Científica

A análise da cronologia das publicações contidas na amostra evidencia uma aceleração pronunciada na produção científica a partir do ano de 2016, alinhada à popularização comercial de unidades IMUs sem fio de baixo custo e à difusão de algoritmos de aprendizado de máquina aplicados à identificação de padrões de movimento. O aumento contínuo do número de trabalhos por ano reflete o caráter emergente e estratégico da temática na agenda global de saúde do trabalhador e na transição para os conceitos de *Operator 4.0*.

Em relação ao perfil geográfico dos grupos de pesquisa, a liderança é exercida por instituições localizadas nos Estados Unidos da América (13 artigos) e Itália (10 artigos), seguidas pela França (7 artigos), China (5 artigos), Canadá (4 artigos) e Alemanha (4 artigos). A expressividade da Itália e da França vincula-se ao forte histórico desses países na pesquisa em ergonomia da atividade e biomecânica industrial, enquanto a liderança americana e chinesa está associada à rápida incorporação de patentes tecnológicas e sensoriamento avançado na indústria de construção e logística. O Brasil marca presença na amostragem com pesquisas

relevantes desenvolvidas em programas de pós-graduação em engenharia e ergonomia (ex.: Freitas et al., 2019).

3.2 Taxonomia dos Dispositivos e Tecnologias de Sensoriamento

A análise detalhada dos 66 artigos permitiu construir uma classificação sistemática das soluções tecnológicas empregadas para a aquisição de dados ergonômicos. Os dispositivos foram divididos em cinco grandes categorias de sensoriamento primário, conforme sintetizado na Tabela 1.

Tabela 1: Categorização dos dispositivos tecnológicos e sensores aplicados à avaliação ergonômica

Tecnologia de Sensoriamento	Mecanismo Físico de Funcionamento	Parâmetros Biomecânicos Mensurados	Frequência na Amostra	Estudos Representativos
Unidades de Medição Inercial (IMUs)	Fusão de acelerômetros, giroscópios e magnetômetros triaxiais acoplados a segmentos corporais.	Ângulos articulares cinemáticos, aceleração angular, inclinação do tronco, flexão de pescoço e rotação de membros.	25	Villalobos e Mac Cawley (2022); Yazdani et al. (2021); Maurer-Grubinger et al. (2021); Caterino et al. (2021); Matijevich et al. (2021); Bassani et al. (2021); Conforti et al. (2019); Alvarez et al. (2012).

Sensores Vestíveis Diversos (Wearables)	Matrizes de pressão resistivas/capacitivas (Velostat), sensores têxteis flexíveis, palmilhas e meias inteligentes.	Distribuição de pressão plantar, força de preensão palmar/aderência, frequência de contatos e postura por smartphones.	26	Choong et al. (2022); Brunzini et al. (2021); Oyekan et al. (2021); Antwi-Afari et al. (2020); Amitrano et al. (2020); Nath et al. (2017); Peppoloni et al. (2016); Sánchez-Margallo et al. (2014).
Eletromiografia de Superfície (sEMG)	Eletrodos sem fio colocados sobre superfícies musculares para captação de potenciais elétricos.	Nível de ativação muscular, amplitude de contração, fadiga muscular localizada e estimativa de carga biomecânica.	14	Lorenzini et al. (2022); Giannini et al. (2020); Baird et al. (2021); McKinnon et al. (2021); Halim et al. (2021); Hellig et al. (2020); Browne e O'Sullivan (2012).

Sistemas Ópticos / Visão (Kinect)	Câmeras RGB-D e sensores de profundidade por luz infra estruturada para rastreamento de esqueleto sem marcadores.	Coordenadas tridimensionais de juntas articulares, estimativa de pose postural e reconstrução de avatares virtuais.	12	Freitas et al. (2019); Otto et al. (2019); Buisseret et al. (2018); Mariño et al. (2018); Plantard et al. (2015); Diego-Mas e Alcaide-Marzal (2014); Haggag et al. (2013).
Eletrogoniômetros	Sensores extensométricos flexíveis fixados diretamente sobre as articulações corporais.	Variação angular contínua em planos anatômicos específicos (ex.: flexão/extensão do punho e cotovelo).	2	McKinnon et al. (2021); Vinhedos et al. (2017).

Como se depreende dos dados da Tabela 1, as **IMUs** e os **sensores vestíveis (wearables)** constituem o núcleo dominante das pesquisas contemporâneas. As IMUs destacam-se por contornar a limitação de oclusão de visão inerente às câmeras ópticas, permitindo a coleta contínua da cinemática em tempo real no chão de fábrica ou canteiro de obras (Matijevich et al., 2021; Vignais et al., 2013). Por sua vez, a eletromiografia de superfície (sEMG) é frequentemente combinada com as IMUs para correlacionar a postura assumida com o esforço muscular real exigido, fornecendo uma métrica direta da fadiga física (Bassani et al., 2021; Lorenzini et al., 2022).

3.3 Camada Computacional e Algoritmos de Inteligência Artificial

Uma contribuição crítica desta revisão consiste em diferenciar os *dispositivos de captura físicos* das *técnicas de análise computacional*. Enquanto os sensores coletam séries temporais puras de aceleração ou voltagem, a interpretação Ergonômica necessita de uma camada de software capaz de converter esses sinais em diagnósticos de risco biomecânico.

Nesse âmbito, a incorporação de técnicas de **Machine Learning (ML)** e **Deep Learning (DL)** atua como um divisor de águas. Algoritmos de aprendizado supervisionado (como *Random Forest*, *Support Vector Machines* - SVM, *K-Nearest Neighbors* - KNN) e redes neurais profundas (como *Long Short-Term Memory* - LSTM e *Convolutional Neural Networks* - CNN) são treinados para:

- **Reconhecimento Autônomo de Atividades (HAR):** Classificar automaticamente se o trabalhador está executando tarefas de elevação de carga, parafusamento, transporte manual ou caminhada (Antwi-Afari et al., 2020; Shrestha et al., 2018);
- **Automação de Protocolos Observacionais:** Mapear os ângulos coletados pelas IMUs e traduzi-los instantaneamente em pontuações numéricas das planilhas RULA, REBA ou EAWS sem necessidade de auditoria visual humana (Maurice et al., 2019; Villalobos e Mac Cawley, 2022);
- **Modelagem Biomecânica Preditiva:** Prever a probabilidade de ocorrência de dor lombar ou lesão em longo prazo a partir do histórico acumulado de micro-traumas posturais (Olivas-Padilla et al., 2021).

3.4 Domínios Profissionais e Setores de Aplicação

A aplicação prática das soluções instrumentadas varia sensivelmente em função das particularidades operacionais de cada setor produtivo:

1. **Setor Industrial e Manufatura Automobilística:** É o domínio com maior volume de trabalhos (Maurice et al., 2019; Caterino et al., 2021; Fang e Zheng, 2022). As pesquisas focam no monitoramento de montadores em linhas de produção, nos quais posturas estáticas prolongadas, flexão excessiva de braços e ciclos curtos geram alta sobrecarga muscular nos ombros e região cervical. Raso et al. (2018) e Oyekan et al. (2021) demonstraram a integração de vestíveis a arquiteturas de

Sistemas Ciber-Físicos (CPS) para ajustar a altura da bancada industrial dinamicamente ao biotipo do operador.

2. **Construção Civil:** Apresenta ambiente de trabalho dinâmico, não estruturado e sujeito a intempéries. Nesses cenários, sobressaem-se abordagens não invasivas baseadas em smartphones acoplados ao peito (Nath et al., 2017) ou palmilhas inteligentes com sensores de pressão que medem a estabilidade postural e a distribuição do peso ao carregar sacos de cimento e operar maquinário pesado (Antwi-Afari et al., 2020; Yu et al., 2018).
3. **Setor Médico-Hospitalar e Odontológico:** Destaca-se por cirurgias minimamente invasivas, laparoscopias e procedimentos odontológicos que exigem extrema precisão manual combinada a posições estáticas desconfortáveis mantidas por horas (Arrighi-Allisan et al., 2022; Baird et al., 2021; Maurer-Grubinger et al., 2021). Nesses estudos, luvas de dados com sensores flexíveis (Sánchez-Margallo et al., 2014) e sensores inerciais na cabeça e tronco são empregados para avaliar a economia de movimento e propor melhorias na pega de instrumentais cirúrgicos e no posicionamento de microscópios.
4. **Setores Operacionais Específicos e Artísticos:** A amostragem identificou aplicações raras e altamente especializadas, como a avaliação do estresse biomecânico em corte manual de carcaças em abatedouros (Villalobos e Mac Cawley, 2022), uso de exoesqueletos militares (Proud et al., 2020) e a prevenção de lesões posturais em músicos profissionais (pianistas e violinistas) por meio de câmeras Kinect (Buisseret et al., 2018).

3.5. EIXOS ESTRATÉGICOS PARA UMA AGENDA DE PESQUISA

Apesar dos avanços quantitativos reportados, grande parte das soluções tecnológicas permanece como protótipo de laboratório (Proof of Concept), enfrentando barreiras para adoção contínua e em larga escala nos ambientes reais de trabalho. A partir dessa constatação, consolida-se uma agenda de pesquisa em quatro eixos prioritários:

3.5.1 Eixo 1: Aceitabilidade, Usabilidade e Conforto do Dispositivo

A tecnologia não pode introduzir riscos ergonômicos secundários. Estudos devem focar em sensores miniaturizados (smart textiles) e na percepção do trabalhador sobre peso, aquecimento, restrição de movimento e estigma visual, evitando a rejeição durante jornadas de 8 horas.

3.5.2 Eixo 2: Privacidade, Ética e Conformidade Regulatória (LGPD / GDPR)

A coleta contínua de dados biomecânicos introduz dilemas éticos sobre uso punitivo pelas lideranças. É imperativo investigar modelos de governança de dados (privacy-by-design) que garantam o anonimato e o uso restrito a ações preventivas do SESMT.

3.5.3 Eixo 3: Processamento Edge Computing e Feedback Ativo em Tempo Real

Como a maioria das pesquisas opera em modo offline, pesquisas futuras devem priorizar arquiteturas de computação na borda (Edge Computing). Isso permitirá o processamento local com alertas hápicos ou visuais instantâneos em posturas críticas, estimulando a autocorreção postural.

3.5.4 Eixo 4: Fusão Sensorial Multimodal e Robustez em Ambientes Industriais

Investigações futuras devem aprofundar algoritmos de fusão sensorial, combinando dados cinemáticos (IMUs), força/pressão e eletrofisiológicos (EMG). Essa abordagem multimodal permitirá construir avatares virtuais do trabalhador com alta fidelidade biomecânica e resilientes a ruídos magnéticos industriais.

CONCLUSÃO

Esta Revisão Sistemática da Literatura cumpriu o objetivo de mapear o estado da arte do uso de dispositivos tecnológicos para avaliação ergonômica ocupacional. A partir da análise dos 66 artigos selecionados via protocolo PRISMA na base Scopus, evidenciou-se o protagonismo das Unidades de Medição Inercial (IMUs) e dos sensores vestíveis (*wearables*), cuja aplicação associada à Inteligência Artificial está transformando a forma como o risco biomecânico é diagnosticado nas indústrias, na construção civil e na saúde.

A principal contribuição teórica e prática deste trabalho residem na superação da visão fragmentada da literatura, fornecendo uma taxonomia que integra o hardware sensório, as técnicas computacionais de aprendizado de máquina e os métodos ergonômicos tradicionais. Ademais, a agenda de pesquisa proposta delineia os caminhos necessários para suplantar os desafios de usabilidade, privacidade ética e processamento em tempo real, pavimentando a transição de um modelo de inspeção ergonômica reativa e pontual para um modelo proativo, contínuo e centrado no ser humano no contexto da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

AKANMU, A. A.; OJELADE, A.; BULBUL, T. Reassigning construction laborers based on body motion analysis. In: **Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)**. IAARC Publications, 2018. p. 1-7.

AKHMAD, S. et al. Wearable IMU wireless sensor network for ergonomic risk assessment smart instrument. In: **2020 6th International Conference on Information Technology Seminar (ITIS)**. IEEE, 2020. p. 213-218.

ÁLVAREZ, D. et al. Ambulatory monitoring of human upper limb joint motion. In: **2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings**. IEEE, 2012. p. 15-19.

AMITRANO, F. et al. Smart sock for foot pressure distribution monitoring. In: **2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)**. IEEE, 2020. p. 1-6.

ANTWI-AFARI, M. F. et al. Construction activity recognition and ergonomic risk assessment using a wearable insole pressure system. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 7, p. 04020077, 2020.

ARRIGHI-ALLISAN, A. E. et al. Ergonomic analysis of functional endoscopic sinus surgery using novel inertial sensors. **The Laryngoscope**, v. 132, n. 6, p. 1153-1159, 2022.

AYODELE, O. A.; CHANG-RICHARDS, A.; GONZÁLEZ, V. Factors affecting workforce turnover in the construction sector: A systematic review. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 2, p. 03119010, 2020.

BAIRD, B. J. et al. Surgeon positioning during awake laryngeal surgery: An ergonomic analysis. **The Laryngoscope**, v. 131, n. 12, p. 2752-2758, 2021.

BASSANI, G.; FILIPPESCHI, A.; AVIZZANO, C. A. A dataset of human motion and muscle activities in manual material handling tasks for biomechanical and ergonomic analyses. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 21, p. 24731-24739, 2021.

BROWNE, A.; O'SULLIVAN, L. A physical interaction assessment approach for medical hand tools for prototype testing using patient care simulators. **Applied Ergonomics**, v. 43, n. 3, p. 493-500, 2012.

BRUNZINI, A. et al. Feasibility of wearable sensors for the ergonomic evaluation of workers in industrial assembly lines. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 15, n. 4, p. 501-512, 2021.

BUDRIONIS, A.; BELLIKA, J. G. The learning healthcare system: Where are we now? A systematic review. **Journal of Biomedical Informatics**, v. 64, p. 87-92, 2016.

BUISSERET, F. et al. Ergonomic evaluation of the risk of developing musculoskeletal disorders in workers with Microsoft Kinect: TRACK TMS. **IRBM**, v. 39, n. 6, p. 436-439, 2018.

CATERINO, M. et al. Enhanced ergonomic assessment methods supported by simulation tools and IoT. **Macromolecular Symposia**, v. 396, n. 1, p. 2000310, 2021.

CERQUEIRA, S. M.; SILVA, A. F.; SANTOS, C. P. Instrumentalized ergonomic assessment: A perspective on current state-of-the-art and future trends. In: **2019 IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG)**. IEEE, 2019. p. 1-4.

CHOONG, S. W. J. et al. A preliminary study on the ergonomic contribution to the engineering design approach of a wheel loader control lever system. **Sustainability**, v. 14, n. 1, p. 122, 2022.

COLDEWEY, B. et al. Causes of use errors in ventilation devices - A systematic review. **Applied Ergonomics**, v. 98, p. 103544, 2022.

CONFORTI, I. et al. Assessment of ergonomics and biomechanical risk in manual material handling by means of a wearable system. In: **2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT**. IEEE, 2019. p. 388-393.

DIEGO-MAS, J. A.; ALCAIDE-MARZAL, J. Using Kinect™ sensor in observational methods for assessing postures at work. **Applied Ergonomics**, v. 45, n. 4, p. 976-985, 2014.

FANG, W.; ZHENG, L. Continuous ergonomic risk perception for manual assembly operations using posture estimation with multiple wearable sensors. **Assembly Automation**, v. 42, n. 2, p. 209-217, 2022.

FREITAS, P. V. A. et al. An ergonomic assessment method using a mobile depth sensor and pose estimation. In: **Proceedings of the 25th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web**. 2019. p. 445-452.

GIANNINI, P. et al. Wearable sensor network for biomechanical overload assessment in manual material handling. **Sensors**, v. 20, n. 14, p. 3877, 2020.

HAGGAG, H. et al. Real time ergonomic assessment for assembly operations using Kinect. In: **2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation**. IEEE, 2013. p. 495-500.

HALIM, I. et al. Integrated posture angle and electromyography signal measurement system for manual material handling assessment. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 13, n. 6, p. 27-38, 2021.

HELLIG, T. et al. Prediction model of the effect of postural interactions on muscle activity and perceived exertion. **Ergonomics**, v. 63, n. 5, p. 593-606, 2020.

KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele University Technical Report, TR/SE-0401, 2004.

LORENZINI, M.; KIM, W.; AJOUDANI, A. An online multi-index approach for human ergonomics assessment in the workplace. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 52, n. 5, p. 812-823, 2022.

MARIÑO, C. et al. Non-invasive monitoring environment: Towards solutions for assessing postures at work. In: **2018 13th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)**. IEEE, 2018. p. 1-4.

MATIJEVICH, E. S.; VOLGYESI, P.; ZELIK, K. E. A promising wearable solution for practical and accurate low back load monitoring in manual material handling. **Sensors**, v. 21, n. 2, p. 340, 2021.

MAURER-GRUBINGER, C. et al. Combining ergonomic risk assessment (RULA) with inertial motion capture technology in dentistry—Using the benefits of two worlds. **Sensors**, v. 21, n. 12, p. 4077, 2021.

MAURICE, P. et al. Human movement and ergonomics: An industry-oriented dataset for collaborative robotics. **The International Journal of Robotics Research**, v. 38, n. 14, p. 1529-1537, 2019.

MCKINNON, C. D. et al. Differences and reliability in wrist posture estimation between video analysis and electrogoniometer methods. **Human Factors**, v. 63, n. 7, p. 1284-1294, 2021.

NATH, N. D.; AKHAVIAN, R.; BEHZADAN, A. H. Ergonomic analysis of construction worker's body posture using wearable mobile sensors. **Applied Ergonomics**, v. 62, p. 107-117, 2017.

OLIVAS-PADILLA, B. E. et al. Stochastic-biomechanical modeling and human motion primitives recognition, in industry, using wearables. **Sensors**, v. 21, n. 7, p. 2497, 2021.

OTTO, M. et al. Evaluation of Kinect applicability for EAWS ergonomic assessments. **Procedia CIRP**, v. 81, p. 781-784, 2019.

OYEKAN, J. et al. Applying a fusion of wearable sensors and a cognitively inspired architecture for real-time ergonomic analysis of manual assembly tasks. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61, p. 391-405, 2021.

PEPPOLONI, L. et al. A novel wearable system for online assessment of biomechanical load risk in repetitive efforts. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 52, p. 1-11, 2016.

PLANTARD, P. et al. Pose estimation with a Kinect for ergonomic studies: Evaluation of the accuracy using a virtual mannequin. **Sensors**, v. 15, n. 1, p. 1785-1803, 2015.

PROUD, J. K. et al. Exoskeleton application for military manual handling tasks. **Human Factors**, v. 64, n. 3, p. 527-542, 2022.

RASO, R. et al. Activity monitoring using wearable sensors in manual production processes - A CPS application for automated ergonomic assessments. **Research Report**, Saarland University, 2018.

REIM, W.; PARIDA, V.; ÖRTQVIST, D. Product-Service Systems (PSS) business models and tactics – A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 97, p. 61-75, 2015.

SÁNCHEZ-MARGALLO, F. M. et al. Application of a motion capture data glove for ergonomic analysis of hand and wrist during laparoscopy. **Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies**, v. 23, n. 6, p. 350-356, 2014.

SHRESTHA, P.; NATH, N. D.; BEHZADAN, A. H. An exploratory sequence alignment approach for better sensor-based human activity recognition. In: **Computing in Civil Engineering 2018**. ASCE, 2018. p. 347-357.

STEFANA, E. et al. Wearable devices for ergonomics: A systematic literature review. **Sensors**, v. 21, n. 3, p. 777, 2021.

VIGNAIS, N. et al. Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. **Applied Ergonomics**, v. 44, n. 4, p. 566-574, 2013.

VILLALOBOS, A.; MAC CAWLEY, A. Predicting slaughterhouse workers' RULA and knife blade scores using low-cost inertial measurement unit sensors and machine learning algorithms. **Applied Ergonomics**, v. 98, p. 103556, 2022.

YAZDANI, A. et al. Is the leader robot a suitable sensor for posture estimation and ergonomic evaluation of a human teleoperator? In: **2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. IEEE, 2021. p. 1946-1952.

YU, Y. et al. Estimating construction workers' physical workload by fusing computer vision and smart insole technologies. In: **Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)**. IAARC Publications, 2018. p. 1-8.