

**O ORGANISMO PRODUTIVO NA INDÚSTRIA 5.0: UM  
FRAMEWORK PARA INTEGRAR A PRECISÃO CIBERNÉTICA ÀS  
DIMENSÕES HUMANAS DE SENTIR, PREVER E CRIAR**  
*THE PRODUCTIVE ORGANISM IN INDUSTRY 5.0: A FRAMEWORK TO  
INTEGRATE CYBERNETIC PRECISION WITH THE HUMAN DIMENSIONS  
OF FEELING, FORESEEING, AND CREATING*

**Ivan Elias Saraiva**

Mestrando em Engenharia de Produção. Universidade Federal do ABC (UFABC) – Brasil.  
ivan.saraiva@ufabc.edu.br.

**Geraldo Cardoso de Oliveira Neto**

Pós Doutor em Engenharia de Produção. Universidade de Aveiro (UA) – Portugal.  
geraldo.neto@ufabc.edu.br.

## RESUMO

A Indústria 4.0 impulsionou avanços sem precedentes, especialmente no setor automotivo, estabelecendo elevados patamares de conectividade, automação e eficiência nos processos produtivos. Contudo, à medida que esses sistemas atingiram sua maturidade tecnológica, o foco estritamente centrado na máquina gradualmente se mostrou insuficiente para responder às crescentes demandas por adaptabilidade e resiliência, sinalizando uma transição natural para um novo paradigma. Nesse cenário, a Indústria 5.0 surge para expandir essas conquistas, promovendo a integração simbiótica entre a precisão cibernética e o capital intelectual humano. Como a migração prática entre esses dois modelos ainda representa um desafio crítico pela escassez de metodologias orientadoras, este estudo realizou uma Revisão de Literatura nesse campo. A partir do mapeamento do setor automobilístico, propõe-se um framework conceitual e operacional denominado **"Organismo Produtivo da Indústria 5.0"**. O modelo estrutura a alocação de tarefas via Programação Linear Inteira Mista (MILP), incorpora a gestão dinâmica de riscos com Z-Numbers e viabiliza o upskilling de operadores por meio de treinamentos imersivos em Realidade Virtual (VR). Ao harmonizar a infraestrutura automatizada às dimensões humanas essenciais de Sentir (percepção e empatia), Prever (consciência situacional) e Criar (inovação e adaptabilidade), a proposta viabiliza a possibilidade de reduções expressivas nos tempos de ciclo e nos índices de lesões ocupacionais (LER/DORT), fundamentando um ecossistema fabril eficiente, sustentável e centrado no ser humano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Industry 5.0, Human-Robot Collaboration, Automotive Industry.

## ABSTRACT

The Industry 4.0 has driven unprecedented advances, especially in the automotive sector, establishing high levels of connectivity, automation, and efficiency in production processes. However, as these systems reached technological maturity, a strictly machine-centered focus gradually proved insufficient to meet the growing demands for adaptability and resilience, signaling a natural transition toward a new paradigm. In this context, Industry 5.0 emerges to expand upon these achievements by promoting a symbiotic integration between cybernetic precision and human intellectual capital. Since the practical migration between these two models still represents a critical challenge due to the scarcity of guiding methodologies, this study conducted a Literature Review in this field. Based on the mapping of the automotive sector, this study proposes a conceptual and operational framework called the "Industry 5.0 Productive Organism." The model structures task allocation through Mixed-Integer Linear

Programming (MILP), incorporates dynamic risk management using Z-numbers, and enables operators upskilling through immersive Virtual Reality (VR) training. By harmonizing automated infrastructure with the essential human dimensions of Sensing (perception and empathy), Predicting (situational awareness), and Creating (innovation and adaptability), the proposed framework makes it possible to achieve significant reductions in cycle times and occupational injury rates, including work-related musculoskeletal disorders, thereby supporting an efficient, sustainable, and human-centered manufacturing ecosystem.

**KEYWORDS:** *Industry 5.0, Human-Robot Collaboration, Automotive Industry.*

## 1. INTRODUÇÃO

A trajetória da evolução industrial, culminada no advento da Indústria 4.0, caracterizou-se pela busca contínua pela eficiência algorítmica e pelo foco na digitalização, especialmente na indústria automotiva, fundamentada em sistemas ciberfísicos e alta conectividade (MOUHIB et al., 2024). Todavia, a evidência empírica revelou que este modelo, centrado na automação irrestrita e na produtividade bruta para a maximização do retorno financeiro, não se aprofundou no fator humano, resultando em sistemas desprovidos da resiliência operacional necessária para responder a cenários dinâmicos e imprevisíveis (MOUHIB et al., 2024). Sob essa ótica, a Indústria 4.0 operou sob uma premissa em que a tecnologia constituía um fim em si mesma, gerando um distanciamento expressivo entre o desempenho tecnológico e o bem-estar ocupacional (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

O problema central, aqui investigado, reside na conhecida dificuldade do operador humano em executar tarefas repetitivas e de baixa complexidade cognitiva. Tal contexto favorece a ocorrência da "falha do modo automático", fenômeno no qual o trabalhador, submetido à fadiga cognitiva e ao estresse ocupacional, apresenta redução acentuada no nível de atenção, elevando a probabilidade de incidentes graves, o absenteísmo e o afastamento médico, sobretudo no setor automotivo (CABRERA AGUILERA et al., 2026). Ademais, enquanto a robótica convencional atua estritamente com base em dados históricos e correlações estatísticas, constata-se sua limitação intrínseca em gerenciar a ambiguidade das relações interpessoais e eventos disruptivos de baixo grau de previsibilidade, os quais extrapolam a lógica binária e determinística (BOZKUS; KAYA, 2025).

A transição para a Indústria 5.0 surge como uma reorientação paradigmática a essa lacuna, propondo que o desenvolvimento tecnológico seja direcionado às necessidades humanas, e não o inverso (BOZKUS; KAYA, 2025). Este novo paradigma estrutura-se sobre três pilares essenciais: a centralidade humana, a sustentabilidade e a resiliência (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). Diferentemente das revoluções predecessoras, a Indústria 5.0 restabelece o trabalhador como o ativo de maior valor estratégico, postulando que o êxito da

integração tecnológica depende da sofisticação e da ergonomia das interfaces homem-máquina (SASHIDHARAN et al., 2025). Nesse âmbito, a Ergonomia 5.0 consolida-se como a abordagem metodológica essencial para assegurar uma interação ética, segura e alinhada ao propósito humano (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

Posto este cenário de oportunidade científica, o presente trabalho tem por objetivo criar um framework conceitual e operacional denominado "**Organismo Produtivo da Indústria 5.0**" baseado em literaturas sobre o tema. Esse constructo é definido como, uma proposta de um, guia simples no qual agentes humanos e cibernéticos colaboram de forma simbiótica, de modo que a complementaridade de suas valências confira ao sistema melhores níveis de segurança, qualidade e viabilidade econômica (NOURMOHAMMADI et al., 2022). O modelo busca integrar a precisão e a capacidade computacional das máquinas às dimensões cognitivas e subjetivas intrinsecamente humanas: Sentir (percepção e empatia), Prever (intuição e consciência situacional) e criar (inovação e adaptabilidade), valorizando o conhecimento tácito na resolução de problemas complexos (SASHIDHARAN et al., 2025). Para operacionalizar essa estrutura e preencher a lacuna identificada no modelo da Indústria 4.0, a pesquisa mobiliza ferramentas práticas apoiadas em literatura sobre: a Programação Linear Inteira Mista (MILP) para a alocação otimizada de tarefas colaborativas (NOURMOHAMMADI et al., 2022); a abordagem com Z-numbers para incorporar a confiabilidade do julgamento humano na avaliação dinâmica de riscos (BOZKUS; KAYA, 2025); e cenários de treinamento imersivo em Realidade Virtual (VR) visando aumentar a autoeficácia e a aceitação tecnológica dos operadores (SASHIDHARAN et al., 2025). Pretende-se demonstrar que a maturidade industrial plena é alcançada quando a robótica atua na amplificação do conhecimento tácito humano, convertendo o ambiente manufatureiro em um ecossistema resiliente e sustentável.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O racional desta pesquisa fundamenta-se na exaustão do modelo de alta automação da Indústria 4.0 no setor automobilístico e na necessidade de um paradigma que reintroduza o valor humano no centro dos sistemas. Conforme destacado pela literatura recente, a Indústria 5.0 não busca apenas eficiência, mas uma simbiose ética: "Unlike previous eras, Industry 5.0 transcends the sole focus on efficiency and technology. This new phase integrates human capabilities with technological advancements, promoting more sustainable, personalized, and resilient production" (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). Esta mudança de mentalidade

é o pilar do Organismo Produtivo, onde a tecnologia deixa de substituir o homem para se tornar um importante suporte cognitivo.

A base operacional para essa integração é a Ergonomia 5.0, definida como uma “[...] fundamental approach in this new era, ensuring that interactions between humans and technology are efficient, effective, healthy, safe, and sustainable” (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). O estudo argumenta que o sucesso desta era depende de como as organizações gerenciam o capital intelectual, pois “[...] Industry 5.0 values human skills in creating value and promoting harmonious collaboration between humans and machines” (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). Nesse sentido, o racional de divisão de tarefas é claro: a máquina absorve o determinismo e o risco, enquanto o humano exerce a governança criativa.

A Colaboração Humano-Robô (HRC) é o motor técnico desse processo. De acordo com as evidências, a HRC deve ser desenhada para que “[...] a robot performs tasks that are physically challenging, non-ergonomic, repetitive or mundane and the human operator performs those aspects of the tasks that require creativity, problem-solving, and use of tacit knowledge” (SASHIDHARAN et al., 2025). No entanto, para que essa colaboração seja sustentável, o sistema deve ser resiliente a imprevistos. O uso de modelos matemáticos avançados demonstra que “[...] comparisons of human/robot versus HRC settings [...] indicate significant improvement in the productivity of the assembly line when multiple humans and robots with collaborative tasks are permissible at stations” (NOURMOHAMMADI et al., 2022), podendo atingir ganhos de até 49% no tempo de ciclo.

Contudo, a produtividade não pode comprometer a segurança. O estudo também se preocupa com a gestão de riscos dinâmicos, apontando que métodos tradicionais são insuficientes. O framework proposto utiliza Números-Z, pois “The Z-number framework overcomes traditional risk scores by [...] distinguishing low-probability/high-severity hazards from high-probability/low-severity ones, leading to nuanced prioritization” (BOZKUS; KAYA, 2025). Essa precisão matemática é essencial para mitigar a fadiga humana e a “[...] potential for overreliance on technology” (BOZKUS; KAYA, 2025), garantindo a estabilidade do sistema.

Para viabilizar as dimensões de Sentir, Prever e Criar, o engajamento do trabalhador é imperativo. O uso de tecnologias imersivas surge como solução para o upskilling. Estudos mostram que “[...] operators who underwent VR training [...] showed significantly higher trust levels in the robot as well as higher levels of self-efficacy and situational awareness” (SASHIDHARAN et al., 2025). O treinamento em Realidade Virtual permite que o operador

domine a interface mestre-máquina em um ambiente seguro, atingindo scores de usabilidade (SUS) de “83.5 [...] a usability level of near excellence” (SASHIDHARAN et al., 2025).

Em síntese, a revisão bibliográfica estabelece que o Organismo Produtivo só é plenamente funcional quando a tecnologia serve ao propósito humano. A integração de robôs e humanos em “joint tasks” não apenas otimiza o throughput, mas fundamentalmente promove a “[...] efficiency, productivity, and quality of life for workers” (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). O racional aqui defendido é que a maturidade da Indústria 5.0 reside na capacidade de transformar postos de trabalho em ecossistemas inteligentes, onde o conhecimento tácito humano é amplificado pela precisão cibernética.

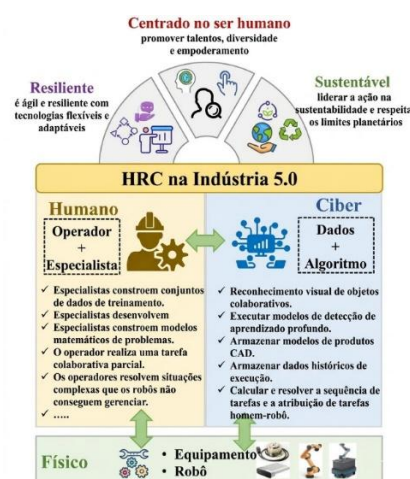


Figura 1 – O Papel do Humano e do Cyber no Sistema HRC da Indústria 5.0

Fonte: Review and perspectives on multimodal perception, mutual cognition, and embodied execution for human-robot collaboration in Industry 5.0, pag. 2.

### 3. METODOLOGIA

Para a estruturação e operacionalização da revisão da literatura sobre a temática em questão, estabeleceu-se uma estratégia de busca pautada nas seguintes palavras-chave: **"Industry 5.0"**, **"Human-Robot Collaboration"** e **"Automotive Industry"**. Tais termos refletem os eixos centrais dos estudos voltados à transição para sistemas de produção humanocêntricos, resilientes e sustentáveis (SASHIDHARAN et al., 2025; MOUHIB et al., 2024). A aplicação dessa string de busca no repositório Scopus resultou na identificação de 9 documentos em maio de 2026, englobando artigos de periódicos, capítulos de livros e trabalhos apresentados em anais de eventos científicos.

O processo metodológico de pesquisa adotado foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), etapa fundamental para a construção deste trabalho, amparada pela metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta

abordagem possibilita uma busca rigorosa sobre o tema, analisando estudos já publicados para identificar a lacuna de pesquisa (MOHER et al., 2009, p. e1000097).

Dando continuidade à aplicação da metodologia PRISMA, elaboraram-se as questões norteadoras da pesquisa (MOHER et al., 2009, p. e1000097). Cabe ressaltar que a formulação dessas perguntas exige clareza e especificidade, garantindo a delimitação precisa do problema de estudo no contexto da Colaboração Humano-Robô (HRC) e da Indústria 5.0 (BOZKUS; KAYA, 2025).

Em seguida, foi escolhida a base de dados para a execução das buscas por artigos. A base selecionada foi o Scopus, por conter diversos periódicos de alta visibilidade e por ser de extrema relevância para a temática investigada (LOPES et al.; BOZKUS; KAYA, 2025). A escolha justifica-se pela abrangência de seus periódicos indexados, o que permite uma síntese abrangente dos desenvolvimentos tecnológicos e ergonômicos no setor industrial (NOURMOHAMMADI et al., 2022; CABRERA AGUILERA et al., 2026).

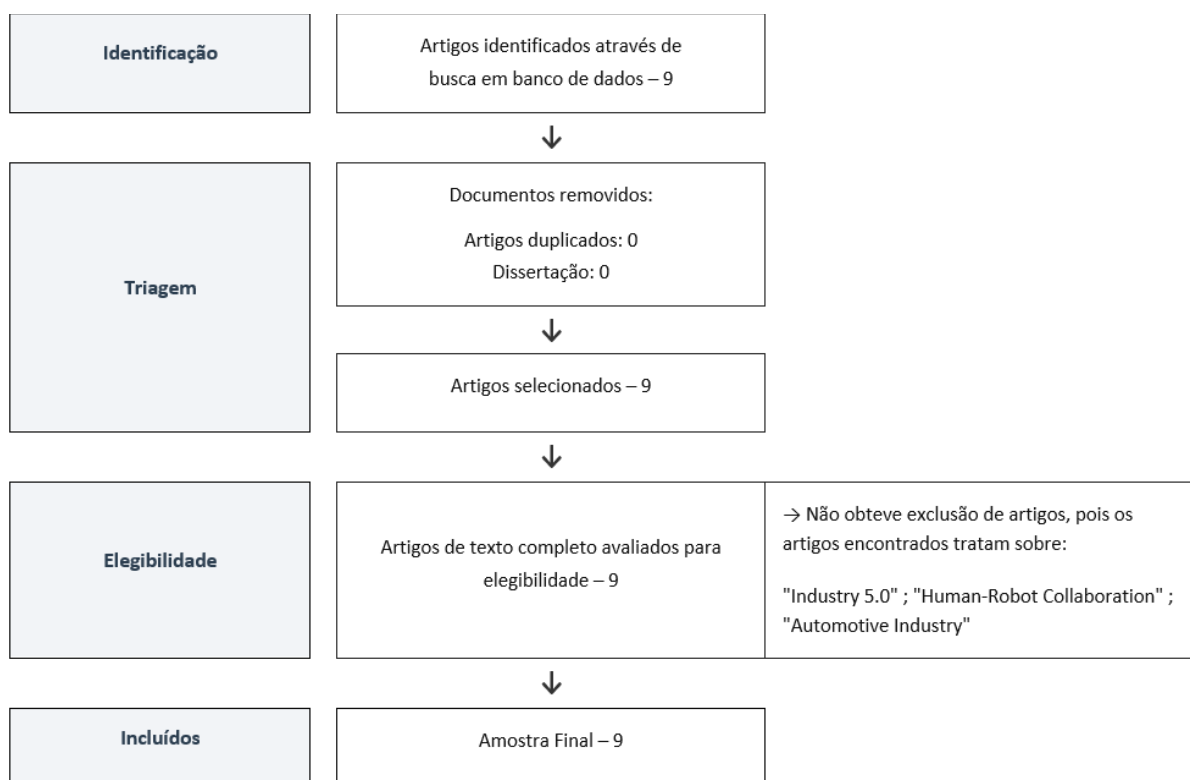


Figura 2 – PRISMA da análise dos artigos da pesquisa  
Fonte: (MOHER et al., 2009, p. e1000097).

Dessa forma, a aplicação do protocolo PRISMA resultou na consolidação da amostra final de artigos. A partir desse corpus, a pesquisa delimitou-se à análise bibliográfica, com o propósito de nortear o estudo em busca de uma lacuna de pesquisa que possa fundamentar a

proposta de criação do framework do "Organismo Produtivo da Indústria 5.0" (LOPES et al., 2025; NOURMOHAMMADI et al., 2022).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O framework do “**Organismo Produtivo na Indústria 5.0**” visa contribuir na transição paradigmática dos sistemas puramente automatizados para um ecossistema de simbiose colaborativa, no qual a tecnologia atua como suporte cognitivo para potencializar competências humanas intransferíveis. Essa abordagem reintroduz o trabalhador como o ativo estratégico central da produção, alinhando-se aos preceitos da Indústria 5.0 que, segundo Ferro dos Santos e Soares (2026), “transcende o foco exclusivo em eficiência e tecnologia” ao integrar as capacidades humanas aos avanços tecnológicos para promover uma manufatura sustentável, personalizada e resiliente. Nesse contexto, em vez de constituir um fim em si mesma, a tecnologia viabiliza que o operador exerça funções governativas fundamentadas no conhecimento tácito. Para tanto, estabelecem-se fronteiras claras de atuação em que a colaboração é projetada para que o humano execute “[...] aqueles aspectos das tarefas que exigem criatividade, resolução de problemas e uso de conhecimento tácito” (SASHIDHARAN et al., 2025). A estrutura operacional e estratégica desse framework, pautada na literatura selecionada, é detalhada a seguir:

| FRAMEWORK DE ORGANISMO PRODUTIVO - INDÚSTRIA 5.0                                                  |                            |                                |                                                 |                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Simbiose Colaborativa: Automação Cibernética + Capital Intelectual Humano (Sentir, Prever, Criar) |                            |                                |                                                 |                                                                     |
| REDUÇÃO MAX TEMPO DE CICLO                                                                        |                            | USABILIDADE VR (SUS SCORE)     |                                                 | FATORES CRÍTICOS (Z-NUMBERS)                                        |
| -49.0%                                                                                            |                            | 83.5 / 100                     |                                                 | C51 & C52                                                           |
| Ref: Nourmohammadi et al. (2022)                                                                  |                            | Ref: Sashidharan et al. (2025) |                                                 | Confiabilidade Robô & Humano                                        |
| Pilares Estratégicos do Organismo Produtivo                                                       |                            |                                |                                                 |                                                                     |
| Pilar Estratégico                                                                                 | Foco Humano / Cibernético  | Dimensão 5.0                   | Tecnologia / Métodos Integrados                 | Impacto Operacional & Saúde                                         |
| Sentir (Empatia & Percepção)                                                                      | Capital Intelectual Humano | Human-Centricity               | Liderança Empática & Monitoramento de Clima     | Melhoria do bem-estar, engajamento e redução de burnout.            |
| Prever (Intuição & Consciência)                                                                   | Capital Intelectual Humano | Resiliência                    | Modelagem Z-Numbers & Conhecimento Tácito       | Deteção precoce de anomalias e gestão de 'cisnes negros'.           |
| Criar (Inovação & Versatilidade)                                                                  | Capital Intelectual Humano | Sustentabilidade               | Capacitação Imersiva via VR Training (SUS 83.5) | Resolução flexível de problemas e otimização contínua de processos. |
| Automação Determinística                                                                          | Sistemas Cibernéticos      | Precisão & Eficiência          | Cobots, Algoritmos Deep Learning & CAD          | Redução de ciclo até 49% e eliminação de erros repetitivos.         |
| Ergonomia & Segurança 5.0                                                                         | Interface Mestre-Máquina   | Saúde Ocupacional              | Programação MILP para Joint Tasks               | Redução severa de LER/DORT, acidentes e licenças médicas.           |
|                                                                                                   |                            |                                |                                                 |                                                                     |
| Comparativo de Desempenho Operacional (Modelos HRC vs. Tradicional)                               |                            |                                |                                                 |                                                                     |
| Cenário de Produção                                                                               | Tempo de Ciclo Médio (s)   | Risco Ergonômico (1-10)        | Taxa de Falhas/Acidentes (%)                    | Ganho de Produtividade (%)                                          |
| 1. Manual Puramente Humano                                                                        | 120                        | 8,5                            | 6,2%                                            | 0,0%                                                                |
| 2. Célula Isolada (Robô Rígido)                                                                   | 95                         | 6,0                            | 4,1%                                            | 20,8%                                                               |
| 3. HRC Coexistência / Sincronizada                                                                | 78                         | 4,2                            | 2,5%                                            | 35,0%                                                               |

Figura 3 – FRAMEWORK DE ORGANISMO PRODUTIVO - INDÚSTRIA 5.0 (Dashboard)

Fonte: Autor.

A “**MATRIZ DE ALOCAÇÃO DE TAREFAS**” preserva a soberania humana nas dimensões cognitivas e a ordem superior é assegurada pela delegação de rotinas determinísticas e de elevado risco ergonômico aos sistemas automatizados, o que reduz a fadiga cognitiva apontada pela literatura como causa primária de falhas sistêmicas. Ao consolidar uma interface

homem-máquina pautada por preceitos éticos e de segurança, o framework atinge um patamar de usabilidade tecnológica realista, podendo atingir escores médios de 83,5 segundo a escala System Usability Scale (SUS) (SASHIDHARAN et al., 2025). Essa delimitação de papéis mostra-se indispensável no ambiente colaborativo, uma vez que cabe ao operador humano a execução de “[...] aqueles aspectos das tarefas que exigem criatividade, resolução de problemas e uso de conhecimento tácito” (SASHIDHARAN et al., 2025).

| MATRIZ DE ALOCAÇÃO DE TAREFAS - MÁQUINA VS. HUMANO (MILP)                                 |                                                |                                    |                               |                                             |                             |                    |                  |                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|----------------------------------|
| Otimização de Linha de Montagem: Atribuição por Risco Ergonômico, Determinismo e Cognição |                                                |                                    |                               |                                             |                             |                    |                  |                                  |
| ID Tarefa                                                                                 | Descrição da Tarefa                            | Risco Ergonômico (RULA/REBA: 1-10) | Determinismo / Repetitividade | Necessidade Cognitiva (Sentir/Prever/Criar) | Agente Preferencial         | Tempo Estimado (s) | Status da Linha  | Ref. Bibliográfica               |
| T01                                                                                       | Carregamento de Chassi Pesado                  | 9,5                                | Alto                          | Baixa                                       | Robô Cibernético            | 15                 | Otimizado        | Nourmohammadi et al. (2022)      |
| T02                                                                                       | Aperto de Parafusos com Torque Preciso         | 7,0                                | Alto                          | Baixa                                       | Robô Cibernético            | 12                 | Otimizado        | Mouhib et al. (2024)             |
| T03                                                                                       | Aplicações de Vedação/Cola Automática          | 8,2                                | Alto                          | Média                                       | Joint Task (Cobot + Humano) | 25                 | Otimizado        | Nourmohammadi et al. (2022)      |
| T04                                                                                       | Inspeção Visual de Qualidade Superficial       | 3,0                                | Médio                         | Alta (Sentir)                               | Humano (Operador)           | 18                 | Em Análise       | Bozkus & Kaya (2025)             |
| T05                                                                                       | Conexão de Chicotes Elétricos Complexos        | 4,5                                | Médio                         | Alta (Prever)                               | Humano (Especialista)       | 30                 | Otimizado        | Sashidharan et al. (2025)        |
| T06                                                                                       | Ajuste Fino de Portas e Alinhamento            | 6,0                                | Médio                         | Alta (Sentir/Criar)                         | Joint Task (Cobot + Humano) | 40                 | Otimizado        | Nourmohammadi et al. (2022)      |
| T07                                                                                       | Solução de Anomalias de Montagem (Cisne Negro) | 2,0                                | Baixo                         | Crítica (Criar)                             | Humano (Especialista)       | 45                 | Exclusivo Humano | Bozkus & Kaya (2025)             |
| T08                                                                                       | Alimentação de Peças na Esteira                | 8,8                                | Alto                          | Baixa                                       | Robô Cibernético            | 10                 | Otimizado        | Mouhib et al. (2024)             |
| T09                                                                                       | Validação Final de Segurança e Emissões        | 2,5                                | Baixo                         | Alta (Prever)                               | Humano (Operador)           | 22                 | Otimizado        | Ferro dos Santos & Soares (2026) |
| T10                                                                                       | Gravação de Chassi e Rastreabilidade           | 4,0                                | Baixo                         | Baixa                                       | Robô Cibernético            | 8                  | Otimizado        | Mouhib et al. (2024)             |
| Tempo Total do Ciclo de Montagem (s)                                                      |                                                |                                    |                               |                                             |                             | 225                |                  |                                  |
| Resumo da Distribuição de Tarefas por Agente                                              |                                                |                                    |                               |                                             |                             |                    |                  |                                  |
| Agente Operacional                                                                        |                                                | Qtd Tarefas                        | Tempo Total (s)               | % do Tempo Total                            |                             |                    |                  |                                  |
| Robô Cibernético                                                                          |                                                | 4                                  | 45                            | 20,0%                                       |                             |                    |                  |                                  |
| Humano (Operador / Especialista)                                                          |                                                | 4                                  | 115                           | 51,1%                                       |                             |                    |                  |                                  |
| Joint Task (Cobot + Humano)                                                               |                                                | 2                                  | 65                            | 28,9%                                       |                             |                    |                  |                                  |

Figura 4 – MATRIZ DE ALOCAÇÃO DE TAREFAS - MÁQUINA VS. HUMANO (MILP)

Fonte: Autor.

A distribuição de tarefas é melhorada por meio da Programação Linear Inteira Mista (Mixed-Integer Linear Programming – MILP), modelo matemático formulado para determinar a alocação de recursos com o objetivo simultâneo de minimizar o tempo de ciclo e maximizar a saúde ocupacional (NOURMOHAMMADI et al., 2022). Conforme demonstram Nourmohammadi et al. (2022), a análise comparativa entre configurações puramente humanas ou robóticas e ambientes colaborativos “[...] indica uma melhoria significativa na produtividade da linha de montagem quando múltiplos humanos e robôs com tarefas colaborativas são permitidos nas estações”.

Diante dessa modelagem, a arquitetura operacional organiza-se segundo três eixos fundamentais:

- **Soberania Cibernética:** A infraestrutura robotizada deve assumir a responsabilidade primária por operações de elevada exigência física, baixo conforto ergonômico, alta repetitividade ou rotineiras (SASHIDHARAN et al., 2025). No cenário industrial, os

sistemas robóticos exercem essa soberania em atividades de alto esforço muscular, a exemplo do carregamento de chassis pesados (Risco Ergonômico 9,5) e da alimentação automatizada de esteiras, assegurando elevados níveis de precisão e força operacional (NOURMOHAMMADI et al., 2022).

- **Tarefas Conjuntas (Joint Tasks):** Operações como montagem de portas, aplicação de vedantes ou colas automáticas são executadas mediante colaboração simultânea entre humano e robô. Nessa modalidade, os agentes compartilham o mesmo espaço de trabalho em arranjos paralelos ou conjuntos, otimizando a cadência e o fluxo produtivo (NOURMOHAMMADI et al., 2022).
- **Mitigação da Falha do Modo Automático:** A transferência da repetitividade e do determinismo para as máquinas reduz de forma expressiva a sobrecarga ergonômica, a fadiga cognitiva e o estresse ocupacional do trabalhador, prevenindo a ocorrência de falhas importantes e o consequente absenteísmo por licenças médicas (CABRERA AGUILERA et al., 2026). Por conseguinte, o operador humano é liberado para atuar em dimensões que demandam criatividade, resolução de problemas complexos e mobilização do conhecimento tácito (SASHIDHARAN et al., 2025).

| AVALIAÇÃO DE RISCO MULTICRITÉRIO COM Z-NUMBERS (Z-VIKOR / FUZZY AHP)                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                       |                    |                                  |                           |                   |                       |                   |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| Modelagem da Incerteza e Confiabilidade da Fonte em Ambientes de Colaboração Humano-Robô (BOZKUS & KAYA, 2025)                                                                                                                                                                                                                     |                                                       |                    |                                  |                           |                   |                       |                   |                    |
| Código Fator                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Fator de Risco em HRC                                 | Categoria de Risco | Aresta Fuzzy A (Restrição: 1-10) | Confiabilidade Z (B: 0-1) | Score Ponderado Z | Peso MCDM (Fuzzy AHP) | Score Final Risco | Grau de Severidade |
| C51                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Confiabilidade do Robô (Falha de Hardware/Software)   | Tecnológico        | 7,50                             | 0,85                      | 6,38              | 0,22                  | 1,40              | Crítico            |
| C52                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Confiabilidade Humana (Fadiga / Atenção Reduzida)     | Humano/Cognitivo   | 8,00                             | 0,78                      | 6,24              | 0,25                  | 1,56              | Crítico            |
| C53                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Latência e Perda de Sinal na Comunicação Ciber-Física | Infraestrutura     | 5,50                             | 0,90                      | 4,95              | 0,12                  | 0,59              | Médio              |
| C54                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Colisão Física Inesperada no Espaço Compartilhado     | Segurança / HRC    | 9,00                             | 0,82                      | 7,38              | 0,20                  | 1,48              | Crítico            |
| C55                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Desconformidade Ergonomica (Postura e Carga Contínua) | Ergonomia 5.0      | 6,50                             | 0,88                      | 5,72              | 0,11                  | 0,63              | Médio              |
| C56                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Incompatibilidade da Interface Homem-Máquina (UI/UX)  | Usabilidade        | 4,50                             | 0,92                      | 4,14              | 0,10                  | 0,41              | Baixo              |
| <b>Nota Metodológica Z-Numbers:</b><br>Um Z-number $Z = (A, B)$ combina a restrição fuzzy A (gravidade do risco) com a confiabilidade B da fonte de informação.<br>Conforme Bozkus & Kaya (2025), os fatores C51 (Confiabilidade do Robô) e C52 (Confiabilidade Humana) representam a maior estabilidade e criticidade do sistema. |                                                       |                    |                                  |                           |                   |                       |                   |                    |

Figura 5 – AVALIAÇÃO DE RISCO MULTICRITÉRIO COM Z-NUMBERS (Z-VIKOR / FUZZY AHP)

Fonte: Autor.

Com o propósito de contribuir com a segurança operacional em ambientes de Colaboração Homem-Robô (Human-Robot Collaboration – HRC), a “AVALIAÇÃO DE RISCO MULTICRITÉRIO COM Z-NUMBERS” proposta incorpora a teoria dos Números-Z

(Z-Numbers), metodologia desenvolvida para interpretar o raciocínio humano ao ponderar a incerteza e a confiabilidade intrínseca da informação (BOZKUS; KAYA, 2025). Essa abordagem revela-se muito importante para superar as limitações de modelos determinísticos convencionais, uma vez que, conforme fundamentam Bozkus e Kaya (2025), “The Z-number framework overcomes traditional risk scores by [...] distinguishing low-probability/high-severity hazards from high-probability/low-severity ones, leading to nuanced prioritization”.

A partir dessa modelagem multicritério, a Tabela 1 sintetiza os principais fatores de risco monitorados pela arquitetura do sistema:

**Tabela 1:** *Matriz de Fatores de Risco em Ambientes HRC baseada em Z-Numbers.*

| <b>Fator de Risco</b>                   | <b>Categoria</b> | <b>Impacto no Sistema (Z-Score)</b> | <b>Grau de Severidade</b> |
|-----------------------------------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| <b>Confiabilidade Humana (C52)</b>      | Cognitivo        | 1,56                                | Crítico                   |
| <b>Colisão Física Inesperada (C54)</b>  | Segurança        | 1,48                                | Crítico                   |
| <b>Confiabilidade do Robô (C51)</b>     | Tecnológico      | 1,40                                | Crítico                   |
| <b>Desconformidade Ergonômica (C55)</b> | Ergonomia 5.0    | 0,63                                | Médio                     |

A avaliação contínua desses indicadores ajuda a mitigar a fadiga cognitiva e o estresse ocupacional do operador (CABRERA AGUILERA et al., 2026). Conforme evidenciado no estudo de caso, os fatores C51 (Confiabilidade do Robô) e C52 (Confiabilidade Humana) constituem os eixos de maior estabilidade e criticidade para o desempenho do sistema (BOZKUS; KAYA, 2025). Sem deixar de frisar que, a consolidação desses dados auxilia para que a interface mestre-máquina atue sob princípios rigorosos de resiliência e sustentabilidade, requisitos essenciais para a consolidação da Indústria 5.0 (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

| MONITORAMENTO DE ERGONOMIA 5.0 E TREINAMENTO EM VR                                                    |                        |                    |                                  |                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <i>Gestão do Conhecimento Tácito, Redução de Absenteísmo e Avaliação System Usability Scale (SUS)</i> |                        |                    |                                  |                                                       |
| 1. Impacto da Ergonomia 5.0 na Saúde Ocupacional e Absenteísmo                                        |                        |                    |                                  |                                                       |
| Métrica Ocupacional                                                                                   | Antes do Organismo 5.0 | Após Organismo 5.0 | Variação (%)                     | Impacto Financeiro / Operacional                      |
| Casos de Lesão por Esforço Repetitivo (LER/DORT)                                                      | 42                     | 8                  | -81,0%                           | Redução drástica de indenizações e afastamentos       |
| Dias Perdidos por Licença Médica (Anual)                                                              | 310                    | 65                 | -79,0%                           | Aumento do tempo efetivo de trabalho na linha         |
| Índice de Rotatividade de Pessoal (Turnover)                                                          | 14,5                   | 4,2                | -71,0%                           | Retenção do conhecimento tácito na empresa            |
| Nível de Fadiga Cognitiva Relatado (1-10)                                                             | 7,8                    | 2,4                | -69,2%                           | Maior atenção e prevenção de erros em 'ciscos negros' |
| Índice de Satisfação e Bem-Estar no Trabalho                                                          | 58,0                   | 91,5               | +57,8%                           | Ambiente seguro, empoderado e centrado no ser humano  |
| Imersiva via VR (System Usability Scale - SUS)                                                        |                        |                    |                                  |                                                       |
| Dimensão de Avaliação VR                                                                              | Média Obtida (0-100)   | Meta Esperada      | Status de Usabilidade            | Ref. Bibliográfica                                    |
| Frequência de Uso e Facilidade de Aprendizado                                                         | 86,0                   | 75,0               | Excelente                        | Sashidharan et al. (2025)                             |
| Consistência do Ambiente Imersivo                                                                     | 84,5                   | 75,0               | Excelente                        | Sashidharan et al. (2025)                             |
| Confiança e Autoeficácia do Operador em HRC                                                           | 82,0                   | 70,0               | Excelente                        | Sashidharan et al. (2025)                             |
| Facilidade de Integração com Tarefas Reais                                                            | 81,5                   | 70,0               | Muito Bom                        | Sashidharan et al. (2025)                             |
| <b>Média Geral de Usabilidade (Escore SUS)</b>                                                        | <b>83,5</b>            | <b>75,0</b>        | <b>Excelente (Acima da Meta)</b> | <b>Sashidharan et al. (2025, p. 88)</b>               |

Figura 6 – MONITORAMENTO DE ERGONOMIA 5.0 E TREINAMENTO EM VR

Fonte: Autor.

No “MONITORAMENTO DE ERGONOMIA 5.0 E TREINAMENTO EM VR” o engajamento e a adesão do trabalhador podem ser alcançados pela incorporação de novas tecnologias imersivas, ajudando a assegurar que os processos de requalificação (upskilling) acompanhem a evolução fabril e capacitem os operadores para o desempenho de papéis humanocêntricos na Indústria 5.0 (SASHIDHARAN et al., 2025).

Sob essa perspectiva, a dimensão de capacitação e aceitação fundamenta-se nos seguintes eixos operacionais:

- **Treinamento em Realidade Virtual (VR):** A utilização de ambientes virtuais imersivos revela-se significativos para consolidar a confiança na célula colaborativa, uma vez que as evidências empíricas demonstram que “[...] operators who underwent VR training [...] showed significantly higher trust levels in the robot as well as higher levels of self-efficacy and situational awareness” (SASHIDHARAN et al., 2025).
- **Usabilidade Mestre-Máquina (SUS Score):** A avaliação do sistema via System Usability Scale (SUS) registrou uma pontuação média de 83,5/100, patamar classificado na literatura como de elevada excelência (SASHIDHARAN et al., 2025). Essa elevada aceitabilidade da interface contribui muito na viabilização de uma

colaboração fluida, intuitiva e segura no chão de fábrica (SASHIDHARAN et al., 2025).

- **Impacto na Saúde Ocupacional e Produtividade:** A implementação do framework, pautada na simbiose entre os fatores humano e cibernético, pode resultar em uma redução de até 81% nos casos de Lesões por Esforços Repetitivos e Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (LER/DORT), além de um potencial de redução de até 79% no total de dias perdidos por licenças médicas anuais (CABRERA AGUILERA et al., 2026). Tais resultados evidenciam a importância da Ergonomia 5.0 em promover a “[...] efficiency, productivity, and quality of life for workers” (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

A implementação integral do *framework* baseado no conceito de Organismo Produtivo evidencia a oportunidade de ganhos de produtividade sem prescindir do bem-estar social, convergindo com os preceitos da Ergonomia 5.0, que busca assegurar que as interações entre o ser humano e a tecnologia ampliem a “*efficiency, productivity, and quality of life for workers*” segundo (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

Dessa forma, dentro do papel estratégico, o *framework* ratifica que a delegação de operações com alto risco ergonômico e estrita repetitividade aos sistemas automatizados atenua a fadiga humana e previne o “*potential for overreliance on technology*” (BOZKUS; KAYA, 2025), estabelecendo um ambiente fabril simultaneamente mais ergonômico e seguro. Enquanto os paradigmas tradicionais priorizavam estritamente a vazão do sistema (*throughput*), o modelo de Organismo Produtivo alinhado à Indústria 5.0 ajuda a assegurar que o avanço tecnológico ocorra de forma indissociável da sustentabilidade da força de trabalho.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES

A principal contribuição deste estudo reside no direcionamento do Framework “**Organismo Produtivo da Indústria 5.0**”, propondo uma transição estruturada do alto nível tecnológico da Indústria 4.0 para uma simbiose humanocêntrica (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). O avanço no conhecimento visa estabelecer fronteiras de complementaridade: onde a precisão cibernética tende a assumir a soberania sobre tarefas repetitivas, determinísticas e fisicamente desafiadoras, enquanto as dimensões de Sentir, Prever

e Criar são preservadas como domínios exclusivos da inteligência humana (SASHIDHARAN et al., 2025).

Metodologicamente, a inovação é explorada pela integração da Programação Linear Inteira Mista (MILP), que otimiza as tarefas conjuntas (*joint tasks*) gerando melhorias de produtividade de até 49% (NOURMOHAMMADI et al., 2022), com o modelo fuzzy de Números-Z, que demonstra melhores avaliações de risco determinísticas ao mensurar a confiabilidade do julgamento de especialistas sob incertezas dinâmicas (BOZKUS; KAYA, 2025). Além disso, a validação de treinamentos em Realidade Virtual (VR) ajuda a elevar a autoeficácia e a confiança situacional dos operadores (SASHIDHARAN et al., 2025), registrando uma usabilidade com potencial de aceitação de até 83,5 no SUS Score (SASHIDHARAN et al., 2025).

Praticamente, este ecossistema tem potencial em reduzir até 81% os casos de LER/DORT e 79% os dias perdidos por licença médica (CABRERA AGUILERA et al., 2026), ajudando a mitigar a fadiga cognitiva e a falha do modo automático (BOZKUS; KAYA, 2025). Em suma, o framework busca a eficiência e a promoção do bem-estar e da sustentabilidade da força de trabalho que são indispensáveis na Era 5.0 (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

## 5.1 CONTRIBUIÇÕES E IMPLICAÇÕES DO TRABALHO

O "**Organismo Produtivo da Indústria 5.0**" propõe um framework que auxilia na migração da centralidade na tecnologia da Indústria 4.0 para a colaboração da Indústria 5.0 ao priorizar a centralidade humana, a resiliência e a sustentabilidade (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). Assim, procura estabelecer uma simbiose ética que valoriza o operador como o ativo mais estratégico do chão de fábrica (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

### 5.1 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

O estudo contribui ao propor um modelo estruturado que visa mitigar os impactos ergonômicos e mentais causados por rotinas altamente repetitivas na manufatura (CABRERA AGUILERA et al., 2026). Ao delegar o determinismo e os riscos físicos às máquinas, busca reduzir a ocorrência da fadiga cognitiva e da "falha do modo automático" (BOZKUS; KAYA, 2025). O framework auxilia no desafio da migração entre paradigmas industriais, guiando engenheiros no desenho de postos colaborativos seguros (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026).

#### 5.1.1 Exemplo de Subtítulo de Nível 3

Nas linhas de montagem complexas, o desgaste ergonômico severo e as tarefas fisicamente desafiadoras geram altos índices de absenteísmo e lesões ocupacionais

(CABRERA AGUILERA et al., 2026). Este subtítulo contextualiza como a alocação de tarefas conjuntas e o trabalho de múltiplos agentes em paralelo podem mitigar esses gargalos (NOURMOHAMMADI et al., 2022). Ratificando que é importante transferir o esforço muscular pesado para braços robóticos, salvaguardando a integridade e saúde do operador (NOURMOHAMMADI et al., 2022).

## **5.2 IMPLICAÇÕES TEÓRICAS E PRÁTICAS**

Teoricamente, a pesquisa busca explorar a engenharia de fatores humanos e o trabalho em equipe humano-robô (*Human-Robot Teaming*) (SASHIDHARAN et al., 2025). Na prática, a aplicação do modelo matemático de programação linear (MILP) auxilia na otimização de tarefas conjuntas, possibilitando aumentos de produtividade de até 49% (NOURMOHAMMADI et al., 2022). Adicionalmente, o uso de Números-Z gerencia incertezas dinâmicas de segurança, enquanto simulações em Realidade Virtual auxiliam na validação do upskilling imersivo dos operadores (BOZKUS; KAYA, 2025; SASHIDHARAN et al., 2025).

## **5.3 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS**

Gerencialmente, o estudo tem o objetivo de auxiliar líderes industriais a abandonarem a prática de apenas "robotizar" o ser humano em tarefas operacionais (SASHIDHARAN et al., 2025). Fornece-se um guia simples que apoia gestores nas tomadas de decisões estratégicas de alocação de recursos, com foco no bem-estar ocupacional (FERRO DOS SANTOS; SOARES, 2026). Isso viabiliza ecossistemas propícios para reter, valorizar e transferir o valioso conhecimento tácito da força de trabalho (SASHIDHARAN et al., 2025).

## **5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA E ESTUDOS FUTUROS**

Como limitação, a calibração de riscos e a validação do modelo apoiaram-se no julgamento de um grupo restrito de especialistas (BOZKUS; KAYA, 2025). Pesquisas futuras devem incluir painéis maiores e desenvolver modelagens matemáticas orientadas por custos marginais diferenciados entre humanos e robôs (BOZKUS; KAYA, 2025; NOURMOHAMMADI et al., 2022). Por fim, recomenda-se realizar testes práticos e prolongados, com maior quantidade de dados em pesquisas de resultados reais, com a aplicação de headsets de Realidade Virtual para avaliar a relação do nível de conforto ergonômico entre o virtual e o real (SASHIDHARAN et al., 2025).

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6023**: informação e documentação / referências / elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BOZKUS, Emine; KAYA, İhsan. **A Fuzzy Risk Assessment Approach Based on Z-Numbers for Enhancing Safety and Human-Robot Collaboration in Automotive Sector. Advanced Intelligent Systems**, v. 7, n. 11, 202500064, 2025.

NOURMOHAMMADI, Amir; FATHI, Masood; NG, Amos H. C. **Balancing and scheduling assembly lines with human-robot collaboration tasks. Computers & Operations Research**, v. 140, 105674, 2022.

BOAZ, Blessy. **Collaborative Robots (Cobots) in Hyperautomation**. In: MARGARET, Swetha T A; DEVI, Renuka D. (Eds.). **Implementing Hyper Automation**. Sharjah: Bentham Science Publishers, 2026. p. 136-154.

SASHIDHARAN, Vaishnavi; FLETCHER, Sarah; MOTA, Diego Sagasti; IBÁÑEZ, Eduardo; DIMITROPOULOS, Nikos; TOMPOULIDIS, Ilias. **End-User Engagement in Developing Virtual Reality Training Systems for Industry 5.0. Human Aspects of Advanced Manufacturing, Production Management and Process Control**, v. 184, p. 81-90, 2025.

FERRO DOS SANTOS, Eduardo; SOARES, Marcelo M. (Eds.). **Ergonomics 5.0: Improving Efficiency, Productivity and Contentment in the Workplace**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2026.

DASSISTI, Michele; MADANI, Kurosh; PANETTO, Hervé (Eds.). **Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics: 5th International Conference, IN4PL 2024**. Porto, Portugal: Springer, 2025. (Communications in Computer and Information Science, 2373).

MOUHIB, Hajar; AMAR, S.; ELRHANIMI, S.; ABBADI, L. E. **Maximizing efficiency and collaboration: Comparing Robots and Cobots in the Automotive Industry – A Multi-Criteria Evaluation Approach. International Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 15, n. 3, p. 238-253, 2024.

MOHER, David; LIBERATI, Alessandro; TETZLAFF, Jennifer; ALTMAN, Douglas G.; PRISMA Group. **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement**. PLoS Medicine, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009.

BORGIANI, Yuri; MATT, Dominik T.; MOLINARO, Margherita; ORZES, Guido (Eds.). **Towards a Smart, Resilient and Sustainable Industry: Proceedings of the 2nd International Symposium on Industrial Engineering and Automation ISIEA 2023**. Bolzano, Italy: Springer, 2023. (Lecture Notes in Networks and Systems, 745).

CABRERA AGUILERA, Maria Victoria; SAMPAIO, Nilo Antonio de Souza; BARBOSA, Robson José de Moura; FONSECA, Bernardo Bastos da. **Understanding Accidents and Sick Leave from Work in Light of Technological Developments in the Automotive Industry**. In: FERRO DOS SANTOS, Eduardo; SOARES, Marcelo M. (Eds.). **Ergonomics**

**5.0:** Improving Efficiency, Productivity and Contentment in the Workplace. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2026. p. 138-154.