EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Avaliação Multicritério de Desempenho e Sustentabilidade em Linhas de Montagem: uma Revisão Sistemática da Literatura

Danielle Silva das Neves
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI

Leandro Magatão
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI

Heitor Silvério Lopes
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI

Resumo: A crescente adoção de robôs colaborativos em linhas de montagem modifica o problema clássico de balanceamento de linhas ao ampliar as possibilidades de alocação de tarefas entre trabalhadores e sistemas automatizados. Paralelamente, a eficiência energética e a redução de impactos ambientais passaram a integrar decisões de projeto e operação. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura, estruturada segundo o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), para analisar como critérios energéticos e ambientais são incorporados ao balanceamento e ao projeto de linhas de montagem, com ênfase em sistemas de colaboração humano-robô. Foram consultadas Scopus, Web of Science e ScienceDirect. As três exportações totalizaram 149 registros; após a identificação de sete duplicidades por DOI, 142 registros foram submetidos à triagem. Dezessete trabalhos foram avaliados em texto completo, sendo 15 estudos primários e duas revisões utilizadas para contextualização. A síntese evidencia predominância de modelos multiobjetivo que combinam tempo de ciclo com consumo de energia, custo, número de estações e, em menor frequência, carbono ou outros indicadores ambientais. Nos estudos de colaboração humano-robô, a participação humana é normalmente representada por capacidade, habilidade, tempo de processamento ou modo de colaboração, enquanto o grau de intervenção humana raramente é tratado como critério decisório independente. Os resultados indicam uma lacuna na integração explícita entre desempenho operacional, consumo energético, impacto ambiental e nível de automação, apontando espaço para modelos de otimização multiobjetivo combinados a métodos multicritério de apoio à decisão.

Palavras-chave: Balanceamento de Linha de Montagem, Colaboração Humano-Robô, Eficiência Energética, Emissões de Carbono, Revisão Sistemática

Multicriteria Evaluation of Performance and Sustainability in Assembly Lines: A Systematic Literature Review

Abstract: This paper presents a systematic literature review of assembly line balancing and design models that incorporate energy or environmental criteria, with emphasis on human-robot collaboration. The review follows the PRISMA framework (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) and uses records retrieved from Scopus, Web of Science, and ScienceDirect. The three exports contained 149 records. After seven DOI-based duplicates were

identified, 142 unique records were screened and 17 full texts were assessed, resulting in 15 primary studies and two reviews used for contextualization. The synthesis shows a strong predominance of multi-objective formulations combining cycle time with energy consumption, cost, number of stations, and, less frequently, carbon-related indicators. In human-robot collaborative systems, human participation is generally modelled through worker skills, processing times, resource assignment, or collaboration modes, whereas the degree of human intervention is rarely treated as an independent decision criterion. The review therefore identifies an opportunity to integrate operational performance, energy consumption, environmental impact, and human intervention within a unified decision framework. Such an approach can combine multi-objective optimization with multicriteria decision analysis to support the selection of assembly-line configurations.

Keywords: Assembly line balancing, Human-robot collaboration, Energy efficiency, Carbon emissions, Systematic literature review

1. Introdução

A transformação dos sistemas produtivos associada à Indústria 4.0 e à emergência da Indústria 5.0 (Breque, De Nul e Petridis, 2021) tem ampliado a utilização de automação, robôs industriais e robôs colaborativos em linhas de montagem. Em paralelo, a pressão por maior eficiência energética e menor impacto ambiental tem deslocado a avaliação de desempenho de uma perspectiva predominantemente produtiva para uma perspectiva que também considera sustentabilidade. Nesse contexto, o problema clássico de balanceamento de linhas de montagem, ou *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP), detalhado por Boysen, Fliedner e Scholl (2007), passa a incorporar novas decisões relacionadas à seleção de recursos, à colaboração humano-robô e ao consumo de energia.

O ALBP consiste, de forma geral, em distribuir tarefas entre estações respeitando relações de precedência e restrições de capacidade. Dependendo da variante, a decisão pode buscar minimizar o número de estações, o tempo de ciclo ou uma combinação desses objetivos. A introdução de robôs modifica essa estrutura porque diferentes recursos podem apresentar diferentes capacidades, tempos de processamento e consumos energéticos. Quando trabalhadores e cobots (robôs colaborativos, do inglês, *collaborative robot*) compartilham o mesmo espaço, surgem ainda diferentes modos de execução, como atuação independente, sequencial, paralela ou colaborativa.

Os estudos recentes mostram que a dimensão ambiental está sendo incorporada de forma crescente. Há trabalhos que tratam diretamente o consumo energético dos robôs, outros que transformam o uso de energia em custo, e estudos que introduzem indicadores de emissões ou pegada de carbono. Li e Wang (2024), por exemplo, formulam um problema de balanceamento com colaboração humano-robô considerando emissões de carbono, enquanto Li et al. (2024) incorporam explicitamente *carbon footprint* ao balanceamento de uma linha robótica. Em outra direção, Li et al. (2026) integram o balanceamento robótico a decisões de fornecimento de energia renovável, considerando eficiência produtiva, pegada de carbono e custo.

A literatura também mostra que a sustentabilidade não é independente do desempenho operacional. Uma solução que reduz o tempo de ciclo pode exigir maior utilização de um recurso robótico e, consequentemente, maior consumo de energia. De forma análoga, uma configuração com menor consumo energético pode demandar mais estações ou alterar a distribuição das tarefas. A natureza conflitante desses critérios explica a predominância de formulações multiobjetivo.

No caso específico da colaboração humano-robô, existe uma questão adicional: qual deve ser a participação de cada recurso na execução das tarefas? Os trabalhos selecionados modelam essa decisão principalmente por meio de habilidades, tempos, disponibilidade, modos de colaboração e atribuição de tarefas. Entretanto, a participação humana nem sempre é apresentada como um critério de decisão independente. Essa lacuna é relevante

porque diferentes níveis de automação podem apresentar desempenhos operacionais e ambientais distintos.

Diante desse cenário, este artigo busca responder à seguinte questão central: como a literatura recente tem incorporado critérios energéticos e ambientais ao balanceamento e ao projeto de linhas de montagem com colaboração humano-robô? Para responder, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com base em registros das bases Scopus, Web of Science e ScienceDirect.

O objetivo geral é analisar os objetivos, indicadores, formas de modelagem da colaboração humano-robô, métodos de solução e lacunas presentes nos estudos recentes que relacionam balanceamento de linhas de montagem e sustentabilidade. Especificamente, pretende-se: (i) identificar como energia e emissões são representadas; (ii) caracterizar como humanos e robôs são incorporados aos modelos; (iii) comparar os objetivos e métodos de solução; e (iv) identificar oportunidades para uma abordagem integrada de desempenho, sustentabilidade e intervenção humana.

Este artigo está organizado em sete seções. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica. A Seção 3 descreve o método da revisão. A Seção 4 apresenta os resultados, discutidos na Seção 5. A Seção 6 sintetiza lacunas e a agenda de pesquisa. A Seção 7 apresenta as conclusões.

2. Fundamentação teórica

O balanceamento de linhas de montagem é um problema combinatório no qual tarefas devem ser distribuídas entre estações de trabalho de acordo com precedências e limites de tempo (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2007). A literatura de balanceamento com robôs industriais e colaborativos tem evoluído de formulações voltadas exclusivamente à produtividade para estruturas que incorporam custo, ergonomia, energia e sustentabilidade. A revisão de Fathi et al. (2024) mostra que a utilização de robôs industriais e colaborativos introduz novas possibilidades de configuração, incluindo diferentes graus de colaboração e diferentes capacidades dos recursos.

Na colaboração humano-robô, o trabalhador e o robô podem atuar sobre tarefas distintas ou conjuntamente. Isso permite combinar flexibilidade e capacidade humana com repetibilidade e precisão robótica. Porém, essa combinação também altera o espaço de decisão do balanceamento. Além da estação, torna-se necessário decidir quem executa a tarefa, qual modo de colaboração será utilizado e quais restrições são aplicáveis.

A dimensão energética é particularmente relevante para linhas robotizadas porque o consumo depende da utilização dos equipamentos, dos tempos de operação e das características do recurso. Petersen et al. (2025), em uma revisão dedicada à eficiência energética em *line balancing*, mostram que energia vem sendo tratada como objetivo ou componente de decisão em diferentes variantes de balanceamento. A revisão reforça que a eficiência energética pode alterar a configuração considerada eficiente quando comparada a uma solução otimizada apenas pelo tempo de ciclo.

Além de energia, alguns estudos avançam para indicadores ambientais mais diretamente relacionados ao impacto da produção. *Carbon footprint* e emissões de CO_2 são utilizados como objetivos em modelos de balanceamento robótico (LI; WANG, 2024; LI et al., 2024). Essa distinção é importante porque consumo energético e impacto ambiental não são conceitos equivalentes: a mesma quantidade de energia pode estar associada a diferentes emissões dependendo da fonte de fornecimento.

Assim, a sustentabilidade em linhas de montagem pode ser observada em diferentes níveis: consumo energético do equipamento; custo associado à energia; emissões decorrentes do consumo; integração de fontes renováveis; e indicadores ambientais mais amplos. A revisão realizada neste trabalho concentra-se nos indicadores efetivamente utilizados pelos

estudos selecionados, evitando extrapolar resultados para dimensões que não foram modeladas.

3. Método

A revisão foi estruturada de acordo com as recomendações do PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021), buscando tornar transparente o processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. O protocolo adotou como unidades de análise artigos científicos recuperados em Scopus, Web of Science e ScienceDirect. As três bases foram escolhidas por sua cobertura de periódicos e conferências nas áreas de engenharia de produção, manufatura, otimização e sistemas industriais.

As estratégias de busca foram construídas a partir de combinações de termos relacionados a quatro conceitos: balanceamento/projeto de linha de montagem; colaboração humano-robô e robótica; energia/eficiência energética; e carbono/sustentabilidade ambiental. O período considerado foi o recorte recente utilizado nas buscas, priorizando publicações dos últimos cinco anos, ao menos, e disponíveis nas bases no momento da coleta.

As buscas foram realizadas em 25 e 26 de agosto de 2026, nas bases ScienceDirect, Scopus e Web of Science. As *strings* utilizadas foram registradas integralmente para garantir a rastreabilidade da revisão. As *strings* foram adaptadas à sintaxe e às limitações de cada base e, portanto, podem diferir se tomadas da forma literal, mas capturam os elementos centrais necessários à busca do contexto de interesse.

- ScienceDirect — 25/08/2026: ("assembly line balancing" OR "travelling worker") AND ("manual assembly" OR "human robot collaboration" OR "multiobjective optimization") AND ("energy efficiency" OR "energy consumption" OR "carbon emission" OR "sustainable manufacturing")
- Scopus — 25/08/2026: ("assembly line balancing" OR "assembly line balancing problem" OR "travelling worker" OR TWALBP) AND ("industrial robot*" OR cobot* OR "collaborative robot*" OR "human robot collaboration" OR "manual assembly") AND ("energy consumption" OR "energy efficiency" OR "standby energy" OR "carbon emission*" OR "green manufacturing" OR "sustainable manufacturing" OR "carbon footprint") AND ("multi-objective" OR "multiobjective" OR "multi objective" OR "epsilon-constraint" OR "epsilon constraint" OR "multiobjective optimization") AND NOT (disassembly) AND NOT (ergonomic) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027
- Web of Science — 26/08/2026: TS=("assembly line balancing" OR "assembly line balancing problem") AND TS=("energy consumption" OR "energy efficiency" OR "carbon footprint" OR "carbon emissions" OR "sustainable manufacturing" OR "green manufacturing") AND TS=("human-robot collaboration" OR "human robot collaboration" OR cobot* OR "collaborative robot*" OR "industrial robot*" OR automation OR "manual assembly")

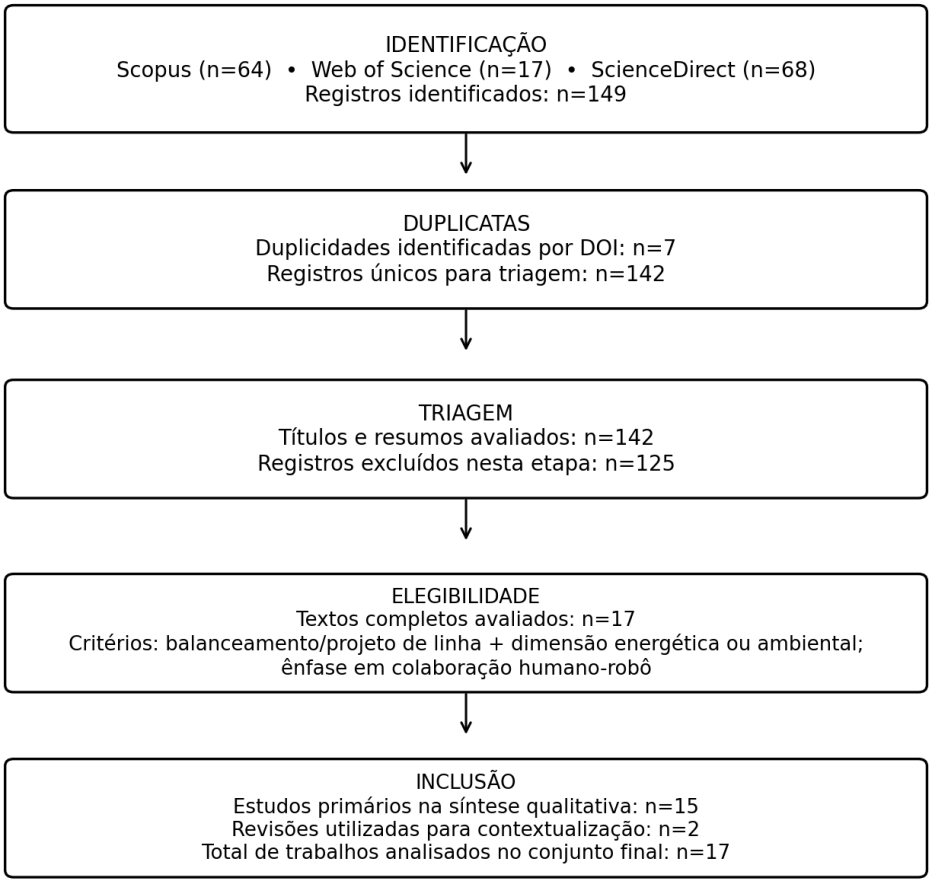
Os critérios de inclusão exigiram relação direta com balanceamento ou projeto de linhas de montagem e presença de pelo menos uma dimensão energética ou ambiental. Estudos com colaboração humano-robô receberam prioridade analítica, mas estudos de linhas robóticas foram mantidos quando apresentavam contribuição direta para energia, carbono ou sustentabilidade. Foram excluídos trabalhos centrados exclusivamente em ergonomia, problemas de desmontagem, problemas de transferência sem aderência ao objeto da revisão e estudos de HRC (*Human-Robot Collaboration*) sem dimensão ambiental pertinente. Durante a etapa de triagem e elegibilidade, os estudos foram excluídos quando não apresentavam aderência aos objetivos da revisão, incluindo trabalhos com foco exclusivo em ergonomia, sem relação com os aspectos de energia, emissões, sustentabilidade, automação ou colaboração humano-robô; estudos que não abordavam o

balanceamento de linhas de montagem; trabalhos fora do contexto de sistemas produtivos; e publicações que não apresentavam conteúdo suficiente para a análise proposta.

As exportações resultaram em 64 registros na Scopus, 17 na Web of Science e 68 na ScienceDirect, totalizando 149 registros. A comparação por DOI identificou sete duplicidades, resultando em 142 registros únicos. A triagem de títulos e resumos conduziu à seleção de 17 trabalhos para leitura integral. Após a leitura dos textos completos, 15 estudos primários foram utilizados na síntese e duas revisões foram mantidas como referências de contextualização e apoio à interpretação dos resultados.

A Figura 1 apresenta o fluxo de seleção. O uso de duas revisões no conjunto final não significa que elas tenham sido tratadas como evidência primária; elas foram utilizadas para contextualizar o estado da arte e comparar a lacuna identificada nesta revisão com sínteses anteriores.

Figura 1 – Fluxo PRISMA da revisão sistemática



Fonte: elaboração própria a partir das exportações das bases e da aplicação dos critérios de seleção.

4. Resultados

4.1 Caracterização dos estudos selecionados

O conjunto final, conforme Tabela 1, evidencia uma literatura recente e predominantemente orientada à otimização. Entre os 15 estudos primários, encontram-se modelos para linhas semi-automáticas, robóticas*, mixed-model, two-sided*, múltiplas linhas e sistemas de colaboração humano-robô. A diversidade de configurações indica que a dimensão ambiental está sendo introduzida em diferentes variantes do ALBP, e não em um único tipo de linha.

Os estudos de HRC são particularmente relevantes para a problemática desta revisão porque permitem observar como a presença simultânea de trabalhadores e robôs altera os objetivos de balanceamento. Zhang et al. (2024) estudam HRC em uma linha mixed-flow sob incerteza; Nourmohammadi, Fathi e Ng (2024) integram balanceamento e programação considerando layouts reto e em U; Huang et al. (2024b) tratam uma linha *two-sided mixed-model*; Chen et al. (2026) integram ergonomia e energia; e Kang e Lee (2026) consideram diferentes modos de colaboração e tempos de processamento fuzzy.

Os estudos primários incluídos foram Rahman, Janardhanan e Ponnambalam (2023); Zhang et al. (2024); Li e Wang (2024); Nourmohammadi, Fathi e Ng (2024); Huang et al. (2024a); Huang et al. (2024b); Wu, Zhang e Xia (2024); Li et al. (2024); Abdous, Cerqueus e Finco (2025); Yilmaz, Aydin e Kucukkoc (2026); Cao, Huang e Xu (2026); Chen et al. (2026); Kang e Lee (2026); e Li et al. (2026). As duas revisões utilizadas para contextualização foram Fathi et al. (2024) e Petersen et al. (2025).

A energia, entretanto, também aparece em estudos sem HRC explícita. Wu, Zhang e Xia (2024) tratam conjuntamente balanceamento robótico e alimentação de peças, utilizando tempo de ciclo e custo total de combustível. Cao, Huang e Xu (2026) formulam uma meta-heurística para minimizar tempo de ciclo e consumo de energia. Li et al. (2026) ampliam a análise para fornecimento energético no longo prazo, incluindo fontes renováveis.

Os dois trabalhos de revisão do conjunto apresentam papel complementar. Fathi et al. (2024) sintetizam tendências de balanceamento com robôs industriais e colaborativos, enquanto Petersen et al. (2025) analisam especificamente eficiência energética *em line balancing*. A existência dessas revisões reforça a maturidade de partes específicas do campo, mas também evidencia a necessidade de examinar conjuntamente HRC, energia e carbono.

4.2 Síntese dos estudos primários

Tabela 1 – Síntese dos estudos primários incluídos na revisão.

Estudo	Configuração	Dimensão ambiental	Principais objetivos	Método
RAHMAN; JANARDHANAN; PONNAMBALAM (2023)	Semi-automática	Energia; risco ergonômico	Tempo de ciclo, energia, risco	Chance-constrained programming
ZHANG et al. (2024)	Mixed-flow HRC	Energia/recursos	Tempo de ciclo e critérios do HRC	Discrete Bees Algorithm
LI; WANG (2024)	HRC	Emissões de carbono	Balanceamento + carbono	Modelo matemático + otimização
NOURMOHAMMADI; FATHI; NG (2024)	HRC; reta/U	Energia do robô	Estações, tempo, custo/energia	MILP + bounds
HUANG et al. (2024a)	Robótica; two-sided	Energia	Tempo de ciclo e energia	MIP + simulated annealing
HUANG et al. (2024b)	HRC; mixed-model; two-sided	Energia; ergonomia	Tempo, energia, ergonomia	MIP + discrete ABC

WU; ZHANG; XIA (2024)	Robótica + feeding	Combustível/energia	Tempo de ciclo e custo de combustível	KEDA
LI et al. (2024)	Robótica	Pegada de carbono	Balanceamento + carbon footprint	Modelo + PSO
ABDOUS; CERQUEUS; FINCO (2025)	HRC / sistema híbrido	Energia	Custo e energia	Modelo biobjetivo
YILMAZ; AYDIN; KUCUKKOC (2026)	HRC; múltiplas linhas	Energia; PM2.5	Assignment, balanceamento, energia	NSGA-II
CAO; HUANG; XU (2026)	Robótica	Energia	Tempo de ciclo e energia	Meta-heurística multiobjetivo
CHEN et al. (2026)	HRC; two-sided	Energia; ergonomia	Tempo, energia, ergonomia	MIP + migrating birds
KANG; LEE (2026)	HRC; mixed-model	Energia	Tempo, custo, suavidade, energia, estações	PFMOP + NSGA-II
LI et al. (2026)	Robótica + energia renovável	Carbon footprint	Eficiência, carbono, custo	Modelo + Deep Q-learning

O estudo de Li et al. (2026), sobre balanceamento robótico com fornecimento de energia renovável, completa o conjunto de estudos primários. O modelo considera três objetivos: eficiência produtiva, pegada de carbono e custo, e integra decisões de balanceamento a decisões de fornecimento de energia. Esse trabalho amplia a fronteira da literatura ao conectar o problema operacional da linha a uma decisão energética de horizonte mais longo.

4.3 Objetivos de otimização e *trade-offs*

O tempo de ciclo é o objetivo operacional mais recorrente nos estudos selecionados. Sua presença é esperada porque o balanceamento busca distribuir o trabalho de forma a evitar estações sobrecarregadas. Quando energia é introduzida, a solução passa a ser avaliada por pelo menos duas dimensões: produtividade e consumo.

Rahman, Janardhanan e Ponnambalam (2023) combinam energia, tempo e risco ergonômico em uma linha semi-automática com tempos de processamento incertos. Nourmohammadi, Fathi e Ng (2024) consideram diferentes objetivos de balanceamento e incluem custo associado a operadores e consumo energético dos robôs. Huang et al. (2024a) formulam explicitamente um problema robótico *two-sided* com os objetivos de tempo de ciclo e consumo total de energia.

Nos modelos HRC, o *trade-off* é ainda mais rico. Huang et al. (2024b) combinam tempo, energia e risco ergonômico; Chen et al. (2026) utilizam uma estrutura semelhante; e Kang e Lee (2026) incluem tempo de ciclo, custo da força de trabalho colaborativa, índice de suavidade, energia e número de estações. Isso demonstra que a colaboração não é tratada apenas como tecnologia de automação, mas como uma configuração que afeta simultaneamente vários critérios.

Os trabalhos de carbono apresentam uma lógica diferente. Li e Wang (2024) incorporam emissões de carbono ao balanceamento com tarefas *cross-station*, enquanto Li et al. (2024) consideram *carbon footprint* em um problema robótico com desenho *cross-station*. Li et al. (2026) avançam para a integração com geração renovável. Em comparação com o número de trabalhos que utilizam energia, os estudos que usam carbono são menos numerosos.

Em termos de decisão, a presença de múltiplos objetivos significa que uma solução não necessariamente domina as demais em todos os critérios. Por isso, vários autores utilizam algoritmos multiobjetivo e geram conjuntos de soluções não dominadas. Esse resultado é relevante para a etapa seguinte de pesquisa: uma fronteira de Pareto representa

alternativas eficientes, mas não determina sozinha qual configuração deve ser escolhida em uma aplicação real.

4.4 Representação da colaboração humano-robô

A colaboração humano-robô aparece nos estudos por meio de diferentes mecanismos de modelagem. Uma primeira forma consiste em definir recursos distintos, como trabalhadores e cobots, cada um com capacidade e tempo de processamento próprios. Outra consiste em estabelecer modos de colaboração, nos quais uma tarefa pode ser executada individualmente ou conjuntamente.

Zhang et al. (2024) exploram a HRC em ambiente *mixed-flow* sob incerteza, mostrando que a representação da variabilidade dos processos é importante para a decisão. Nourmohammadi, Fathi e Ng (2024) consideram diferentes tipos de humanos e robôs com diferentes habilidades e níveis de energia, além de restrições como mudança de ferramentas, zoneamento e requisitos tecnológicos.

Kang e Lee (2026) explicitam diferentes níveis de HRC e utilizam processamento *fuzzy* para representar incerteza. Já Yilmaz, Aydin e Kucukkoc (2026) trabalham com múltiplas linhas e atribuição de modelos, relacionando decisões de *assignment* ao consumo de energia. Essas abordagens mostram que o nível de automação pode ser alterado pela própria estrutura de alocação.

Apesar disso, existe uma diferença entre representar a participação humana e avaliá-la como critério. Nos estudos selecionados, a participação humana aparece principalmente como uma variável operacional: recurso disponível, capacidade, habilidade, tempo ou modo de execução. A análise dos estudos selecionados indica uma menor concentração de trabalhos que integram simultaneamente desempenho produtivo, sustentabilidade e intervenção humana, em comparação com estudos que analisam esses aspectos de forma isolada ou em combinações parciais.

Essa diferença é central para a lacuna identificada. Se duas soluções possuem desempenho semelhante, mas uma exige maior automação e outra maior participação humana, a escolha pode depender de prioridades gerenciais, disponibilidade de trabalhadores, estratégia de automação e objetivos de sustentabilidade. Portanto, a seleção da alternativa final pode exigir uma camada de decisão além do algoritmo de otimização.

4.5 Indicadores ambientais

O consumo de energia é o indicador ambiental mais frequente no conjunto analisado. Se tomarmos a Tabela 1, o indicador aparece em 11 dos 15 estudos. Ele aparece como consumo direto, custo de combustível ou energia, ou como variável vinculada à utilização dos robôs. A predominância desse indicador pode ser explicada pela facilidade de integrá-lo a modelos matemáticos de balanceamento.

Carbon footprint e emissões de carbono aparecem em menor quantidade. Li e Wang (2024) tratam diretamente das emissões de carbono em uma linha HRC, enquanto Li et al. (2024) utilizam *carbon footprint* como objetivo. O trabalho de Li et al. (2026) acrescenta fontes renováveis, conectando a decisão de produção à origem da energia utilizada.

Yilmaz, Aydin e Kucukkoc (2026) acrescentam material particulado fino (PM2.5), um indicador de poluição atmosférica associado a partículas com diâmetro aerodinâmico de até 2,5 μm, à discussão ambiental associada ao consumo dos cobots. Entretanto, no conjunto final, indicadores de ciclo de vida, materiais, resíduos e impactos ambientais além de energia e carbono não são recorrentes. Isso sugere que a dimensão ambiental da literatura de ALBP ainda está fortemente concentrada em impactos operacionais.

Outra observação importante é que energia e a emissão de carbono não devem ser tratados como sinônimos. O consumo energético é uma medida física ou econômica associada à operação, enquanto a emissão de carbono depende também da matriz energética e de

fatores de emissão. Essa distinção torna especialmente relevante o estudo de configurações em que a fonte de energia pode ser modificada.

4.6 Métodos de modelagem e solução

A natureza combinatória do balanceamento favorece formulações de programação inteira mista para instâncias de menor porte e métodos aproximados para problemas maiores. Entre os estudos selecionados, aparecem MILP/MIP (*Mixed-Integer Linear Programming / Mixed-Integer Programming*), programação por restrições (CP - *Constraint Programming*), formulações *fuzzy* e diferentes meta-heurísticas multiobjetivo.

Algoritmos evolucionários e populacionais são recorrentes: Artificial Bee Colony, PSO (*Particle Swarm Optimization*), NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* II), Estimation of Distribution Algorithm, Simulated Annealing, Migrating Birds Optimization e Deep Q-learning. A escolha do método é normalmente relacionada ao tamanho e à complexidade da instância, bem como ao número de objetivos.

Wu, Zhang e Xia (2024) propõem uma abordagem KEDA (*Knowledge-guided Estimation of Distribution Algorithm*) para combinar conhecimento específico do problema *com Estimation of Distribution Algorithm*. Huang et al. (2024a) utilizam *simulated annealing* multiobjetivo para uma linha robótica *two-sided* com *setup times* e restrições adicionais. Huang et al. (2024b) empregam uma Artificial Bee Colony discreta especializada. Li et al. (2026) utilizam Deep Q-learning para obter soluções aproximadas de Pareto em um problema que combina balanceamento e fornecimento renovável.

A diversidade metodológica confirma que não existe ainda um procedimento dominante para o problema. Mais importante, a escolha do algoritmo de otimização não elimina a necessidade de decidir como avaliar as alternativas. A geração de uma fronteira eficiente resolve a etapa de busca, mas não necessariamente a etapa de escolha.

5. Discussão

A síntese dos estudos permite identificar quatro tendências principais. A primeira é a passagem de modelos predominantemente produtivos para modelos multiobjetivo. A segunda é o crescimento da representação da colaboração humano-robô como elemento de projeto da linha. A terceira é a predominância de energia em comparação com outros indicadores ambientais. A quarta é a permanência de uma lacuna na integração entre intervenção humana, automação e sustentabilidade em uma estrutura de decisão única.

A primeira tendência é observada pela presença recorrente de tempo de ciclo combinado com energia, custo, ergonomia e número de estações. Essa mudança é consistente com a necessidade de avaliar sistemas produtivos sob múltiplas perspectivas. Em vez de buscar somente a maior produtividade, os modelos procuram soluções que satisfaçam diferentes objetivos simultaneamente.

A segunda tendência é a maior sofisticação dos modelos HRC. Estudos recentes consideram diferentes modos de colaboração, trabalhadores com diferentes habilidades, cobots com capacidades distintas, layouts e incerteza. Isso mostra que a colaboração deixou de ser apenas uma característica tecnológica e passou a ser uma variável de projeto da linha.

A terceira tendência revela uma assimetria. Energia é relativamente frequente porque pode ser associada diretamente à operação dos equipamentos. Carbono aparece em menos estudos e outros impactos ambientais são ainda menos recorrentes. A literatura, portanto, oferece uma base consistente para modelagem energética, mas ainda apresenta espaço para ampliar a avaliação ambiental.

A quarta tendência é a mais relevante para pesquisas futuras. O grau de intervenção humana raramente é tratado como critério independente. A literatura mostra como distribuir tarefas entre humanos e robôs, mas não necessariamente como comparar configurações

com diferentes níveis de automação sob uma perspectiva multicritério. Essa lacuna é particularmente importante quando a finalidade é avaliar *trade-offs* entre desempenho, sustentabilidade e participação humana.

Uma possibilidade metodológica consiste em combinar otimização multiobjetivo e *Multiple Criteria Decision Analysis* (MCDA). A primeira etapa produziria um conjunto de alternativas não dominadas. A segunda permitiria comparar essas alternativas segundo critérios definidos para o caso, tais como tempo de ciclo, consumo energético, emissões e grau de intervenção humana. Métodos como TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), VIKOR (*VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) ou outras técnicas multicritério poderiam ser avaliados conforme a natureza dos dados e as preferências do decisor.

Essa integração também evita um problema comum: escolher arbitrariamente uma solução Pareto sem explicitar os critérios que justificam a escolha. Em uma aplicação industrial, a solução final depende de prioridades e restrições que não estão necessariamente representadas na função objetivo. Uma abordagem multicritério torna esse processo mais transparente.

6. Lacunas de pesquisa e agenda futura

Com base na síntese realizada, cinco lacunas podem ser destacadas. A primeira é a integração explícita entre intervenção humana e automação. Embora a maioria dos estudos HRC permita alterar a atribuição de tarefas, poucos operacionalizam a participação humana como critério independente.

A segunda lacuna está relacionada aos indicadores ambientais. O predomínio de energia e carbono indica uma base sólida, mas ainda há espaço para incorporar impactos de ciclo de vida, emissões indiretas, materiais e outras dimensões ambientais quando os dados estiverem disponíveis.

A terceira lacuna é a validação empírica. Parte importante dos estudos utiliza instâncias benchmark ou dados sintéticos para comparar algoritmos. Estudos com dados reais de linhas de montagem podem aproximar os modelos das decisões industriais e permitir estimativas mais realistas de energia e emissões.

A quarta lacuna está na integração de decisões de diferentes níveis. O balanceamento normalmente é tratado como problema operacional, enquanto o fornecimento de energia, a aquisição de equipamentos e a configuração tecnológica podem envolver decisões estratégicas. Li et al. (2026) mostram que é possível aproximar esses níveis ao integrar balanceamento e energia renovável.

A quinta lacuna é o apoio à seleção da alternativa final. A existência de uma fronteira Pareto não significa que o gestor tenha uma decisão pronta. A utilização de MCDA após a otimização representa uma possibilidade de pesquisa aplicada para explicitar preferências e comparar soluções não dominadas.

7. Conclusões

Este artigo apresentou uma revisão sistemática da literatura sobre balanceamento e projeto de linhas de montagem com critérios energéticos e ambientais, com ênfase na colaboração humano-robô. A revisão foi estruturada segundo o PRISMA (2020) e utilizou três bases: Scopus, Web of Science e ScienceDirect. Foram identificados 149 registros, sete duplicidades foram removidas, 142 registros foram triados e 17 trabalhos foram analisados em texto completo. O conjunto final reuniu 15 estudos primários e duas revisões utilizadas para contextualização.

Os resultados mostram que a literatura recente é predominantemente multiobjetivo. O tempo de ciclo permanece como critério central, mas é combinado com energia, custo, número de estações, ergonomia e, em menor escala, carbono e outros indicadores

ambientais. Nos sistemas HRC, a colaboração é representada por diferentes recursos, habilidades, tempos e modos de execução, mas a participação humana raramente aparece como critério decisório independente.

A principal contribuição da revisão é evidenciar uma lacuna na integração entre desempenho operacional, sustentabilidade e grau de intervenção humana. A literatura já dispõe de modelos capazes de representar energia e colaboração humano-robô, mas esses elementos ainda são tratados de forma heterogênea e nem sempre são integrados em uma estrutura única de decisão.

Como implicação para trabalhos futuros, recomenda-se desenvolver um modelo de balanceamento multiobjetivo que considere simultaneamente desempenho, consumo energético, impacto ambiental e intervenção humana, seguido por uma etapa de decisão multicritério. Essa abordagem pode ser aplicada a estudos de caso reais e permitir uma análise explícita do trade-off entre automação e participação humana.

Como limitações, destacam-se a dependência das bases consultadas, das *strings* utilizadas, do período de busca e da heterogeneidade dos indicadores e instâncias dos estudos. A revisão não realiza meta-análise quantitativa porque os artigos utilizam métricas, modelos e dados de entrada distintos. Ainda assim, o conjunto analisado permite identificar tendências consistentes e uma agenda de pesquisa diretamente relacionada ao desenvolvimento de linhas de montagem mais eficientes, sustentáveis e orientadas à interação entre pessoas e automação.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

ABDOUS, M.-A.; CERQUEUS, A.; FINCO, S. Collaborative Assembly Line Design: a bi-objective model for minimizing costs and energy consumption. IFAC-PapersOnLine, v. 59, n. 10, p. 1904-1909, 2025. DOI: 10.1016/j.ifacol.2025.09.320.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. A classification of assembly line balancing problems. European Journal of Operational Research, v. 183, n. 2, p. 674-693, 2007. BREQUE, Maija; DE NUL, Lars; PETRIDIS, Athanasios. *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. DOI: 10.2777/308407

CAO, Z.; HUANG, D.; XU, S. Minimizing cycle time and energy consumption in robotic assembly line: a multi-objective metaheuristic. Computers & Operations Research, v. 192, 107501, 2026. DOI: 10.1016/j.cor.2026.107501.

CHEN, N.; NING, J.; YANG, F.; WANG, D. Multi-objective human-robot collaborative two-sided assembly line balancing problem with the optimization of ergonomics and energy consumption. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2026. DOI: 10.1007/s10696-025-09651-4.

FATHI, M.; SEPEHRI, A.; GHOBAKHLOO, M.; IRANMANESH, M.; TSENG, M.-L. Balancing assembly lines with industrial and collaborative robots: current trends and future research directions. Computers & Industrial Engineering, v. 193, 110254, 2024. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110254.

KANG, H.-Y.; LEE, A. H. I. Multi-objective mixed-model assembly line balancing with human-robot collaboration and fuzzy processing time. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, v. 142, p. 2565-2597, 2026. DOI: 10.1007/s00170-025-17076-4.

LI, Y. C.; WANG, X. Human-robot collaboration assembly line balancing considering cross-station tasks and the carbon emissions. Advances in Production Engineering & Management, v. 19, n. 1, p. 31-45, 2024. DOI: 10.14743/apem2024.1.491.

LI, Y.; QIAO, Z.; CHI, Y.; GUO, L.; YAN, R. Robotic assembly line balancing considering the carbon footprint objective with cross-station design. Computers & Industrial Engineering, v. 190, 110045, 2024. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110045.

LI, Y.; SALDANHA-DA-GAMA, F.; KUCUKKOC, I.; LIU, D. Robotic assembly line balancing with on-site renewable energy supply. International Journal of Production Economics, v. 302, 110204, 2026. DOI: 10.1016/j.ijpe.2026.110204.

HUANG, Y.; SHENG, B.; FU, G.; LUO, R.; LU, Y. Multi-objective simulated annealing algorithm for robotic mixed-model two-sided assembly line balancing with setup times and multiple constraints. Applied Soft Computing, v. 156, 111507, 2024. DOI: 10.1016/j.asoc.2024.111507.

HUANG, Y.; SHENG, B.; LUO, R.; LU, Y.; FU, G.; YIN, X. Solving human-robot collaborative mixed-model two-sided assembly line balancing using multi-objective discrete artificial bee colony algorithm. Computers & Industrial Engineering, v. 187, 109776, 2024. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109776.

NOURMOHAMMADI, A.; FATHI, M.; NG, A. H. C. Balancing and scheduling human-robot collaborated assembly lines with layout and objective consideration. Computers & Industrial Engineering, v. 187, 109775, 2024. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109775.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.

PETERSEN, J.; NOURMOHAMMADI, A.; FATHI, M.; GHOBAKHLOO, M.; TAVANA, M. Line balancing for energy efficiency in production: a qualitative and quantitative literature analysis. Computers & Industrial Engineering, v. 205, 111144, 2025. DOI: 10.1016/j.cie.2025.111144.

RAHMAN, H. F.; JANARDHANAN, M. N.; PONNAMBALAM, S. G. Energy aware semi-automatic assembly line balancing problem considering ergonomic risk and uncertain processing time. Expert Systems with Applications, v. 231, 120737, 2023. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120737.

WU, C.-G.; ZHANG, R.; XIA, Y. A knowledge-guided Estimation of Distribution Algorithm for energy-efficient Joint Robotic Assembly Line Balancing and Feeding Problem. Swarm and Evolutionary Computation, v. 88, 101579, 2024. DOI: 10.1016/j.swevo.2024.101579.

YILMAZ, O.; AYDIN, N.; KUCUKKOC, I. Bi-objective optimization of human-robot collaborative mixed-model multiple assembly lines considering model assignment and energy consumption. Journal of Computational and Applied Mathematics, v. 473, 116876, 2026. DOI: 10.1016/j.cam.2025.116876.

ZHANG, X.; FATHOLLAHI-FARD, A. M.; TIAN, G.; YASEEN, Z. M.; PHAM, D. T.; ZHAO, Q.; WU, J. Human-Robot Collaboration in Mixed-Flow Assembly Line Balancing under Uncertainty: an Efficient Discrete Bees Algorithm. Journal of Industrial Information Integration, v. 41, 100676, 2024. DOI: 10.1016/j.jii.2024.100676.