


PROJETO DE UMA NOVA LINHA DE PRODUÇÃO DE INDÚSTRIA 4.0, COM ÊNFASE NA MÃO DE OBRA HUMANA E SISTEMAS ROBÓTICOS, BASEADO EM INDICADORES DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO POR GÊMEOS DIGITAIS

 <https://doi.org/10.56238/arev7n1-001>

Data de submissão: 01/12/2024

Data de publicação: 01/01/2025

Manoel de Assis Monteiro

Engenheiro Mecânico, Especialista em Dinâmica e Controle de Sistemas Robóticos Acadêmico do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL
E-mail: manoel_assis@hotmail.com

Gil Eduardo Guimarães

Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL
E-mail: gil.guimaraes@itegam.org.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2800-4620>

Nelson Marinelli Filho

Doutor em Engenharia Mecânica Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL
E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4362-0132>

Rodrigo Fernando dos Santos Salazar

Doutor em Ciências – Química Analítica Professor do Curso de MBA em Agronegócio - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Esalq/USP – SP – BRASIL
E-mail: r.f.s.salazar@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5808-4321>

Geraldo Nunes Correa

Doutor em Engenharia Mecânica Professor do Curso Sistemas de Informação da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - MG – BRASIL
E-mail: geraldo.correa@uemg.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5477-6953>

RESUMO

Este artigo apresenta a modelagem e análise de uma nova linha de produção no contexto da Indústria 4.0, integrando tecnologias como gêmeos digitais, robôs colaborativos (COBOTS) e sistemas de comando e supervisão. São comparados dois cenários: uma linha de produção tradicional, operada

exclusivamente por humanos, e uma linha automatizada, com interação humano-robô. A pesquisa utilizou o software Plant Simulation para modelar e simular esses cenários, avaliando indicadores como produtividade, custos, fadiga dos operadores e segurança. Os resultados demonstraram aumento significativo da produtividade, melhoria das condições de trabalho e maior sustentabilidade. Também foram discutidos os impactos sociais e econômicos, com ênfase na necessidade de requalificação da mão de obra e na promoção de ambientes de trabalho mais seguros e ergonômicos.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Gêmeos digitais, Robótica colaborativa, Produtividade, Sustentabilidade, Ergonomia.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, também chamada de Quarta Revolução Industrial, representa uma transformação significativa nos processos produtivos, integrando tecnologias digitais, físicas e biológicas. Ela é marcada por inovações como robótica avançada, inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), manufatura aditiva e análise de *big data*, que automatizam processos e criam fábricas inteligentes. Esses avanços, caracterizados por sistemas ciber-físicos (CPS) que monitoram ambientes e tomam decisões descentralizadas, elevam a eficiência e flexibilidade da produção industrial (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016; SMITH; JOHNSON, 2020).

Distinta das revoluções industriais anteriores, a Indústria 4.0 cria um ecossistema de produção interconectado e autônomo (GROOVER, 2019). Tecnologias como robótica avançada otimizam a produção e reduzem riscos para trabalhadores, enquanto IA e aprendizado de máquina permitem manutenção preditiva e redução de custos (SOUZA; OLIVEIRA, 2023; MILLER; TAYLOR, 2019). A IoT conecta dispositivos na cadeia produtiva, permitindo customização em massa e maior eficiência operacional (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016). A análise de *big data* oferece *insights* valiosos para otimização de processos e melhoria da qualidade (SMITH; JOHNSON, 2020), enquanto a manufatura aditiva reduz desperdícios e promove flexibilidade na produção (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).

A Indústria 4.0 também exige força de trabalho qualificada em programação, análise de dados e manutenção de sistemas, demandando requalificação contínua (MILLER; TAYLOR, 2019). Embora aumente a produtividade e reduza custos, traz desafios como desemprego tecnológico para trabalhadores menos qualificados. Apesar disso, novos empregos, que exigem habilidades mais avançadas, emergem, reforçando a importância da educação continuada para mitigar impactos negativos decorrentes da falta de qualificação (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).

A rápida adoção dessas tecnologias é essencial para a competitividade global de empresas e economias, destacando a necessidade de políticas públicas para educação e inclusão (MILLER; TAYLOR, 2019). Relatórios, como o do *World Economic Forum* (2020), enfatizam a importância de estratégias sustentáveis e inclusivas, assegurando uma transição justa para a Indústria 4.0. Além dos benefícios mais evidentes como maior flexibilidade de trabalho e redução de custos, é crucial equilibrar os avanços tecnológicos com ações que promovam inclusão e preparação de futuras gerações (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).

Este artigo tem como objetivo apresentar um caso específico de desenvolvimento de tecnologia robótica em processos produtivos, em instalações de produção automatizadas e já com acesso à boa parte das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Além disso, tem por objetivos secundários a

avaliação deste novo paradigma de trabalho e como pode impactar a produtividade humana e nos padrões atuais sobre as capacidades de trabalho, emprego e qualificação profissional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial, caracteriza-se pela convergência do mundo físico e digital, com tecnologias emergentes como robótica avançada, inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), manufatura aditiva e sistemas ciber-físicos (CPS). Essa interconectividade total eleva a eficiência e flexibilidade produtiva, criando fábricas autônomas e personalizadas (KAGERMANN et al., 2013; LEE et al., 2015).

As revoluções industriais anteriores marcaram avanços como a mecanização a vapor, eletrificação e automação básica, mas a Indústria 4.0 transcende ao integrar big data, IA e IoT para produção flexível e otimização de recursos (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016). As tecnologias centrais incluem:

- **Robótica Avançada:** Robôs colaborativos (cobots) trabalham lado a lado com humanos, adaptando-se a *feedback* em tempo real para tarefas complexas (SOUZA; OLIVEIRA, 2023; MILLER; TAYLOR, 2019).
- **IA e Aprendizado de Máquina:** Sistemas ciber-físicos analisam dados em tempo real, permitindo manutenção preditiva e maior eficiência (LEE et al., 2015).
- **IoT e Big Data:** Sensores conectam dispositivos e otimizam processos, antecipando falhas e reduzindo perdas (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).
- **Manufatura Aditiva:** Impressão 3D cria peças complexas sob demanda, com flexibilidade e menos desperdício (Brynjolfsson e McAfee, 2016).
- **Sistemas Ciber-Físicos:** Integram sensores e atuadores em tempo real, ajustando operações automaticamente para maior eficiência (KAGERMANN et al., 2013).

A Indústria 4.0 revoluciona a manufatura, promovendo eficiência, flexibilidade e personalização sem precedentes.

2.1 ROBÓTICA COLABORATIVA (COBOTS) E A AUTOMAÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS

A robótica colaborativa, conhecida como "cobots", é uma inovação central na Indústria 4.0, transformando o cenário da automação industrial. Diferentemente dos robôs tradicionais, que operam isoladamente em áreas restritas, os cobots são projetados para interagir com humanos de maneira

segura e eficiente. Essa interação combina a precisão e repetição características dos robôs com a flexibilidade e capacidade de adaptação dos trabalhadores humanos, otimizando os processos produtivos (SICILIANO; KHATIB, 2016).

A demanda por automação flexível motivou a introdução dos cobots, que oferecem uma solução acessível para empresas de diferentes portes. Eles desempenham um papel fundamental na melhoria da eficiência e da segurança nas linhas de montagem, especialmente em pequenas e médias empresas que não dispõem da infraestrutura necessária para robôs convencionais (Groover, 2019). Os cobots viabilizam uma forma de automação mais acessível, garantindo um ponto de entrada para modernização industrial.

A colaboração humano-robô é viabilizada por sensores avançados, algoritmos de controle e sistemas de monitoramento de segurança. Os cobots detectam a presença humana e ajustam suas operações em tempo real, eliminando a necessidade de barreiras físicas. Além disso, sua capacidade de aprendizado os torna altamente flexíveis, permitindo a reprogramação rápida para diferentes tarefas e a adaptação a mudanças no ambiente produtivo. Essa flexibilidade é particularmente importante para indústrias com alta personalização e variação de produtos, como a manufatura de bens de consumo (BAYLIS; SARTORI, 2018; SAFFIOTTI et al., 2015).

A integração dos cobots nas linhas de produção traz várias vantagens. Em primeiro lugar, eles reduzem o tempo de ciclo das operações ao assumir tarefas repetitivas e demoradas, enquanto os trabalhadores humanos podem se concentrar em atividades mais complexas e criativas (VILLANI et al., 2018). Essa divisão de responsabilidades aumenta a produtividade e melhora a qualidade dos produtos finais. Além disso, os cobots melhoram a ergonomia, automatizando tarefas que envolvem movimentos repetitivos ou levantamento de cargas pesadas, reduzindo o risco de lesões musculoesqueléticas e aumentando a satisfação dos trabalhadores (Baylis; Sartori, 2018).

Na indústria automotiva, os cobots realizam tarefas de alta precisão, como montagem de componentes eletrônicos e fixação de parafusos, melhorando a qualidade e a consistência dos produtos (Villani et al., 2018). Já na eletrônica, são utilizados em montagens delicadas, como placas de circuito impresso, onde sua precisão minimiza erros e reduz a fadiga dos trabalhadores (Groover, 2019).

Outro benefício significativo é a segurança do trabalho e saúde ocupacional. Avanços em sensores de proximidade e algoritmos de detecção de movimentos permitem que os cobots operem lado a lado com humanos, interrompendo atividades automaticamente em caso de proximidade excessiva. Esses sistemas de segurança têm reduzido as taxas de acidentes de trabalho, especialmente em indústrias de alta tecnologia (SAFFIOTTI et al., 2015; IFR, 2020).

Combinando segurança, flexibilidade e eficiência, os cobots transformam o ambiente de trabalho, promovendo ergonomia, maior produtividade e integração efetiva entre humanos e máquinas. Eles se destacam como um elemento chave para o avanço sustentável da automação industrial na Indústria 4.0 (Villani et al., 2018).

2.2 IMPACTOS SOBRE A FORÇA DE TRABALHO

A Indústria 4.0 está revolucionando processos produtivos e impactando diretamente a mão de obra humana, transformando a natureza do trabalho, as qualificações demandadas e a empregabilidade. Essa revolução tecnológica, baseada em automação avançada, robótica colaborativa e inteligência artificial (IA) eleva a eficiência e reduz custos. Entretanto, altera significativamente o mercado de trabalho, substituindo tarefas repetitivas e manuais por funções mais complexas e digitais (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).

O aumento da automação, impulsionado por sistemas ciber-físicos e IA, ameaça empregos tradicionais, especialmente em indústrias como a manufatura, onde robôs substituem trabalhadores em linhas de montagem e soldagens. Ao mesmo tempo, surgem novas funções relacionadas à manutenção de sistemas automatizados e programação. Contudo, essas oportunidades demandam alta qualificação, dificultando a transição para trabalhadores com menor escolaridade (MILLER; TAYLOR, 2019; SMITH; JOHNSON, 2020).

A requalificação é uma prioridade para empresas e governos. Trabalhadores precisam adquirir competências como programação, análise de *big data* e controle de sistemas ciber-físicos. Treinamentos em linguagens como Python e C++ e em tecnologias emergentes tornam-se essenciais para competir no mercado da Indústria 4.0. Empresas que oferecem ambientes de aprendizado contínuo, com programas de capacitação em robótica colaborativa e IA, têm mais sucesso na adaptação às mudanças (FREY; OSBORNE, 2017; Groover, 2019).

Essa transição também traz desafios sociais. A automação avançada pode acentuar desigualdades ao favorecer trabalhadores qualificados enquanto marginaliza os menos preparados. Políticas públicas focadas em educação técnica, parcerias entre universidades e empresas e incentivos à criação de centros de inovação são fundamentais para garantir uma transição inclusiva. Assim, a força de trabalho pode se adaptar às novas demandas tecnológicas e aproveitar as oportunidades geradas pela Indústria 4.0 (ACEMOGLU; RESTREPO, 2020).

Os robôs colaborativos, por exemplo, substituem humanos em tarefas repetitivas e fisicamente extenuantes, mas criam novas funções em supervisão e análise. Na manufatura automotiva, cobots otimizam processos de montagem e inspeção, enquanto sistemas de IA assumem funções

administrativas e financeiras, eliminando cargos tradicionais. Essa automação avançada exige que trabalhadores evoluam de operadores para gestores de processos digitais, promovendo uma mudança estrutural na empregabilidade (VILLANI et al., 2018; FREY; OSBORNE, 2017).

Para mitigar os impactos da automação, empresas devem investir em treinamentos contínuos, enquanto governos precisam promover políticas inclusivas que reduzam barreiras de entrada para trabalhadores menos qualificados. Iniciativas como certificações, incentivos fiscais para capacitação tecnológica e cooperação com instituições educacionais são essenciais para garantir uma transição equilibrada (FREY; OSBORNE, 2017).

A Indústria 4.0 não apenas substitui empregos, mas redefine o trabalho e os caminhos de carreira. Trabalhadores precisam desenvolver novas habilidades para prosperar no ambiente digital, e a força de trabalho global precisa de suporte contínuo para superar os desafios dessa transformação tecnológica, aproveitando ao máximo suas oportunidades (BRYNJOLFSSON; MCAFEE, 2016).

Essa transição também traz desafios sociais. A automação avançada pode acentuar desigualdades ao favorecer trabalhadores qualificados enquanto marginaliza os menos preparados. Políticas públicas focadas em educação técnica, parcerias entre universidades e empresas, e incentivos à criação de centros de inovação são fundamentais para garantir uma transição inclusiva. Assim, a força de trabalho pode se adaptar às novas demandas tecnológicas e aproveitar as oportunidades geradas pela Indústria 4.0 (ACEMOGLU; RESTREPO, 2020).

Os robôs colaborativos, por exemplo, substituem humanos em tarefas repetitivas e fisicamente extenuantes, mas criam novas funções em supervisão e análise. Na manufatura automotiva, cobots otimizam processos de montagem e inspeção, enquanto sistemas de IA assumem funções administrativas e financeiras, eliminando cargos tradicionais. Essa automação avançada exige que trabalhadores evoluam de operadores para gestores de processos digitais, promovendo uma mudança estrutural na empregabilidade (VILLANI et al., 2018; FREY; OSBORNE, 2017).

Para mitigar os impactos da automação, empresas devem investir em treinamentos contínuos, enquanto governos precisam promover políticas inclusivas que reduzam barreiras de entrada para trabalhadores menos qualificados. Iniciativas como certificações, incentivos fiscais para capacitação tecnológica e cooperação com instituições educacionais são essenciais para garantir uma transição equilibrada (FREY; OSBORNE, 2017).

2.3 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

A simulação digital é um elemento central da Indústria 4.0, permitindo que empresas otimizem processos produtivos de forma virtual antes de implementá-los no mundo real. Com ferramentas

avançadas, é possível modelar e analisar cenários, testar configurações de produção e prever o impacto de novas tecnologias. Essas simulações, alinhadas aos conceitos de sistemas ciber-físicos (CPS) e IoT, possibilitam uma integração contínua entre o mundo físico e digital, melhorando a eficiência, flexibilidade e personalização (LEE et al., 2015; KAGERMANN et al., 2013).

A simulação virtual em ambientes produtivos permite a modelagem detalhada de processos industriais, como o desempenho de linhas de produção e fluxos de trabalho. Com ela é possível minimizar erros, prever falhas e ajustar variáveis em tempo real, otimizando a utilização de recursos. A análise de dados históricos também facilita a projeção de impactos de mudanças nos processos produtivos, garantindo decisões mais seguras e competitivas (Negahban; Smith, 2014; CHEN et al., 2020).

Ferramentas como o *Plant Simulation*, desenvolvido pela Siemens, destacam-se pela versatilidade. Este *software* modela fábricas em 2D e 3D, analisa capacidade produtiva e otimiza fluxos logísticos. Ele permite identificar gargalos, avaliar mudanças no *layout* e prever o impacto de novas tecnologias. Casos de uso mostraram melhorias significativas, como uma redução de 15% no tempo de ciclo de produção e um aumento de 20% na utilização de recursos, gerando economias importantes (Jahangirian et al., 2010; Smith; Johnson, 2020).

A aplicação de simuladores na análise de produtividade é outra vantagem. Ao criar modelos digitais, empresas podem monitorar métricas como taxa de produção e tempo de ciclo, identificando áreas de ineficiência. Essa abordagem também permite testar tecnologias emergentes, como robótica colaborativa e IA, antes de grandes investimentos, reduzindo riscos e maximizando retornos. Estudos indicam aumentos de produtividade de até 12% com a aplicação de simuladores (Groover, 2019; Lee et al., 2015).

Além da produtividade, a simulação auxilia na tomada de decisões estratégicas. Por exemplo, ao planejar expansões ou introduzir novas linhas de produtos, as empresas podem prever impactos detalhados em suas operações, minimizando incertezas. Essa capacidade de modelar variáveis complexas torna a simulação uma ferramenta indispensável para ambientes industriais modernos (Jahangirian et al., 2010).

A integração da simulação com tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e *big data*, fortalece a criação de fábricas inteligentes. Dados coletados por sensores são usados para ajustes em tempo real, permitindo a personalização em massa e otimizando recursos. Isso é vital não apenas para a eficiência, mas também para a sustentabilidade, reduzindo desperdícios e otimizando o uso de materiais e energia. A simulação, portanto, não apenas melhora o desempenho industrial, mas também promove práticas mais sustentáveis (KAGERMANN et al., 2013; Smith; Johnson, 2020).

Em suma, a simulação digital na Indústria 4.0 transforma o processo produtivo ao conectar o mundo físico e digital, oferecendo soluções eficientes, estratégicas e sustentáveis para as demandas da manufatura moderna.

2.4 CASOS DE SUCESSO NA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

A implementação de tecnologias da Indústria 4.0, como robótica colaborativa, IoT e inteligência artificial (IA), tem gerado casos notáveis de sucesso, destacando melhorias em produtividade, eficiência e qualidade. A Audi AG integrou robôs colaborativos (cobots) em suas linhas de montagem, otimizando a precisão, consistência na produção e reduzindo riscos ergonômicos para trabalhadores humanos (Wehner; Schulz, 2018). Na fábrica digital de Amberg, a Siemens aplicou sistemas ciber-físicos (CPS) e IoT, alcançando uma taxa de qualidade de 99,998%, com redução de custos e desperdícios (Bauer et al., 2016). Outro exemplo é uma fábrica de embalagens no Reino Unido que, com IA para manutenção preditiva, reduziu o tempo de inatividade em 15% e aumentou a produtividade em 12% (Cooper et al., 2019).

Apesar dos benefícios, a automação levanta preocupações sobre empregabilidade. Estudos indicam que até 47% dos empregos nos EUA estão em risco de automação (Frey; Osborne, 2017). No entanto, tecnologias da Indústria 4.0 também criam novas funções em áreas como manutenção de robôs, programação e análise de dados (Brynjolfsson; McAfee, 2016). Programas de requalificação, como os implementados pela Bosch, destacam a importância de preparar trabalhadores para essas novas demandas tecnológicas (Grzybowska; Łupicka, 2017).

Comparações entre linhas de produção automatizadas e tradicionais revelam ganhos significativos de produtividade e eficiência com automação. Robôs colaborativos permitem maior precisão e menores desperdícios, enquanto linhas tradicionais são mais flexíveis e adaptáveis, mas sujeitas a maior variabilidade nos resultados e fadiga dos operadores (Groover, 2019). Apesar dos desafios de investimento e reestruturação, linhas automatizadas também melhoram condições de trabalho e promovem práticas sustentáveis, reduzindo consumo de energia e geração de resíduos (Cooper et al., 2019).

A adoção da Indústria 4.0 enfrenta desafios, incluindo altos custos iniciais, resistência à mudança e falta de qualificação da força de trabalho. Pequenas e médias empresas (PMEs) frequentemente enfrentam dificuldades em justificar investimentos devido ao retorno financeiro a longo prazo (Grzybowska; Łupicka, 2017). Além disso, a integração de sistemas antigos com novas tecnologias apresenta problemas de interoperabilidade e segurança cibernética, exigindo infraestruturas robustas e padrões universais (Negahban; Smith, 2014; Bauer et al., 2016).

A cibersegurança é uma preocupação crescente, pois o aumento da conectividade nas fábricas digitais expõe sistemas a ataques cibernéticos, ameaçando interrupções na produção e roubo de dados sensíveis. Estratégias de proteção são essenciais para garantir operações seguras e confiáveis (Bauer et al., 2016).

Apesar dos obstáculos, casos de sucesso e estudos indicam que a transição para a Indústria 4.0 é viável e traz benefícios significativos, desde que acompanhada de investimentos em infraestrutura, treinamento e estratégias de gestão. Preparar a força de trabalho e adotar práticas seguras e sustentáveis são passos fundamentais para que empresas aproveitem as oportunidades da transformação digital.

3 METODOLOGIA

Para responder à hipótese de pesquisa (Quais os impactos significativos da implementação de tecnologias robóticas em processos produtivos da Indústria 4.0 sobre a produtividade e sobre a mão de obra humana e Robótica?), a abordagem metodológica adotada faz uso de simulação digital. A ferramenta selecionada para esse fim é o *software Plant Simulation*, que permite a modelagem de processos produtivos e a criação de cenários diversos para análise comparativa.

3.1 CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS

A pesquisa utiliza dois cenários principais, com características idênticas de *layout* e sistemas de transporte:

- **Linha A:** Operada exclusivamente por seres humanos. Neste cenário, todas as operações são manuais ou necessitam de intervenção humana (característica da Indústria 3.0) em que a produtividade, os custos, e os níveis de fadiga dos operadores são monitorados;
- **Linha B:** Operada por seres humanos em integração com robôs colaborativos. Esse cenário representa uma linha de produção em que os robôs e humanos trabalham de forma colaborativa (característica da Ind. 4.0), com análise dos impactos da automação parcial sobre os indicadores mencionados.

A construção dos cenários no simulador segue um fluxo lógico, baseado nas etapas críticas da manufatura, permitindo que as variáveis de interesse sejam comparadas diretamente.

3.2 COLETA DE DADOS NO SIMULADOR

Os seguintes dados são extraídos do *software* de simulação para alimentar a matriz de decisão baseada em lógica Fuzzy:

1. **Produtividade:** Incluindo taxa de produção, tempo de ciclo, e redução de erros. Esses dados são obtidos diretamente dos relatórios de produção do *Plant Simulation*, que fornece uma visão detalhada do desempenho de cada linha;
2. **Empregabilidade:** Medida pela variação no número de empregados e pela taxa de substituição de trabalhadores. Esses dados são simulados através da alocação de operadores humanos e robôs, e do impacto que isso gera na força de trabalho;
3. **Qualificação Profissional:** Monitoramento da necessidade de requalificação dos operadores humanos para trabalhar em uma linha automatizada. O *software* permite simular diferentes níveis de treinamento e medir como isso afeta a eficiência dos trabalhadores.
4. **Condições de Trabalho:** O impacto ergonômico e a segurança no ambiente de trabalho são analisados com base nas operações manuais versus automáticas, monitorando a redução de movimentos repetitivos e a diminuição do esforço físico dos operadores.

3.3 FATORES DE ANÁLISE E INDICADORES

Os principais indicadores analisados na pesquisa incluem:

- **Taxa de Produção** (unidades por hora): Para medir a eficiência das linhas de produção.
- **Redução de Erros:** Percentual de defeitos eliminados com o uso de robôs.
- **Custo de Produção:** Comparação entre os custos operacionais de uma linha operada por humanos e uma com robôs colaborativos.
- **Fadiga dos Operadores:** Nível de cansaço físico registrado nos operadores da Linha A em comparação com os da Linha B, que contam com o apoio de robôs.
- **Segurança e Ergonomia:** Redução dos acidentes de trabalho e melhoria nas condições ergonômicas.

3.4 CONSIDERAÇÕES ÉTICAS E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa envolve uma análise profunda da substituição de trabalhadores humanos por robôs, o que levanta questões éticas importantes sobre empregabilidade e qualificação profissional. Esses aspectos são tratados com cuidado na análise dos dados, assegurando que a pesquisa não fomente a desvalorização do trabalho humano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PRODUTIVIDADE

É desejo de toda indústria que seus processos tenham as características mais eficientes tornando-a mais competitiva, características essas tal como Produtividade, Repetibilidade e Flexibilidade hoje presente nas tecnologias emergentes da indústria 4.0.

Com base na simulação dos cenários com o método do Gêmeo Digital, os resultados alcançados de produtividade ganharam destaque apresentando uma capacidade instalada da nova linha acima de 100% como mostra a **fig. 1**, permitindo que a linha possa receber novos modelos de produtos (com sua capacidade de flexibilidade), tenha o tempo disponível necessário para a manutenção preventiva (programada), evitando sacrificar também o cumprimento dos horários de descanso (intervalos) e horas extras, em função da linha ter capacidade de carga para recuperar atrasos produzidos por não conformidades e paradas não programadas (manutenção corretiva).

FIGURA 01: Indicador de produção de um turno de 08:00.



Com os resultados promissores de produção, também houve a possibilidade (conforme mostra a **fig.2**) de Re- Lay Out dos departamentos de suporte ao processo tal como almoxarifado que teve o redimensionamento do espaço útil com uso dos COBOT's executando o abastecimento dos AGV's (antes feito por um colaborador) assim como a redução da área do perímetro que o AGV deve percorrer para abastecer a linha. A manutenção, se adequando como suporte e laboratório para treinamento (técnicos e operadores) e testes cinemáticos dos Robôs assim como a sua programação, e uma área de lazer ou descanso dos colaboradores para os intervalos (Fig. 2).

FIGURA 02: Comparativo do aproveitamento das áreas de almoxarifado após re-lay out.



4.2 CUSTOS

São assim apresentados na **tabela 1** tal como os custos de investimento e custos fixos previstos para a implementação do projeto, onde o mesmo possui vários itens de produção Nacional, mas com cotação em moeda estrangeira, dessa forma recomendamos o uso de reservas em moeda estrangeira para plena quitação dos fornecedores logo no primeiro mês (período do comissionamento das máquinas) para que o retorno do investimento (R.O.I) possa ser reconhecido diretamente com os resultados de produção.

Despesas de investimento são assim definidos como todo recurso aplicado para aquisição de máquinas, equipamentos e insumos para operacionalizar um processo. Despesas fixas, são todos os recursos destinados a aquisição de insumos, partes e peças e serviços de terceiros, para garantir a manutenção operacional dos equipamentos nas suas rotinas de trabalho seja em sistemas autônomos, semi-automáticos ou manuais. Para o primeiro mês de produção com um único turno de trabalho a base de cálculo para o R.O.I se define na somatória das despesas de investimento (D. INV) e despesas fixas (D.F) e no segundo mês a base de cálculo do R.O.I será considerada somente as despesas fixas (uma vez as despesas de investimentos já em plena quitação).

A **tabela 1**, apresenta o resultado da produção com um único turno de trabalho (oito horas) para um dia com mês de 22 dias e ano de 11 meses, porquanto alcançando R.O.I negativo para o primeiro mês, mas um promissor resultado para o segundo mês de 265,13%, quando a base de cálculo nesse segundo mês, considerou apenas as despesas fixas. Na **tabela 2** que corresponde a dois turnos de trabalho, para o primeiro mês, novamente as despesas de investimento somada as despesas fixas

(com destaque nos itens 12-14-15-16), sofreram alteração nos valores em função da adição de mais despesas operacionais e seus derivados, proporcionalmente com uma força de trabalho maior (dois turnos) os indicadores de produção apresentaram resultados maiores, mas com R.O.I negativo para o primeiro mês, e segundo mês alcançando margem de produção de 365,96%. Na **tabela 3** considerando três turnos de trabalho, observamos que há um R.O.I já no primeiro mês 25,76% e segundo mês de 413,2%.

TABELA 01: Resultados de produção e faturamento para um único turno de 08:00.

N	CUSTOS - PROJETO IND 4.0 2024	LINHA - IND 4.0	CLASSE	PRODUTO:	NOTEBOOK - DELL I7	Nº TURNOS
1	Técnicos - Fabricante dos Robôs. (Treinamento e Comissionamento)	R\$ 45.000,00	D.INV.			1
2	COBOT'S (Aquisição) X 4 UNIDADES	R\$ 1.264.830,88	D.INV.	VALOR UNITÁRIO	R\$ 972,18	
3	A.G.V (Aquisição) X 4 UNIDADES	R\$ 480.000,00	D.INV.	IND 3.0	STATUS	IND 4.0
4	FERRAMENTAS E DISPOSITIVOS	R\$ 50.000,00	D.INV.	31	PRODUÇÃO - TURNO	71
5	INTEGRAÇÃO SUPERVISÓRIO COM MÁQUINAS EQUIPAMENTO, COBOT E A.G.V	R\$ 245.000,00	D.INV.	31	PRODUÇÃO - DIA	71
6	INTEGRAÇÃO DE MÁQUINAS EQUIPAMENTO AOS COBOT'S	R\$ 190.000,00	D.INV.	682	PRODUÇÃO - MÊS (22 DIAS)	1562
7	INTEGRAÇÃO DE PERÍMETROS DE SEGURANÇA - COBOT'S	R\$ 130.000,00	D.INV.	7502	PRODUÇÃO - ANO (11 MESES)	17182
8	INTEGRAÇÃO DE A.G.V	R\$ 88.000,00	D.INV.	R\$ 7.293.294,36	FATURAMENTO ANUAL BRUTO	R\$ 16.703.996,76
9	PISTAS PARA A.G.V	R\$ 72.000,00	D.INV.			
11	TREINAMENTO DE COLABORADORES JUNTO AO FABRICANTE DE COBOT'S	R\$ 170.000,00	D.INV.		FATURAMENTO MENSAL BRUTO	R\$ 1.518.545,16
	DESPESAS DE INVESTIMENTO	R\$ 2.734.830,88		1º MÊS	FATURAMENTO MENSAL LIQUIDO	-R\$ 1.632.181,97
12	ENERGIA ELÉTRICA	R\$ 36.000,00	D.F		RETORNO INVESTIMENTO MÊS	-51,80%
13	MANUTENÇÃO DA LINHA	R\$ 90.000,00	D.F			
14	OPERADORES (Salários) - R\$ 2.300 :	R\$ 11.286,45	D.F			
15	MANUTENÇÃO DOS COBOT'S (PARTES E PEÇAS)	R\$ 160.000,00	D.F	2º MÊS	FATURAMENTO MENSAL BRUTO	R\$ 1.518.545,16
16	CUSTO COM MÃO DE OBRA ESPECIALIZADA - Técnicos (Salários) - R\$ 4.000	R\$ 28.609,80	D.F		FATURAMENTO MENSAL LIQUIDO	R\$ 1.102.648,91
17	MANUTENÇÃO PREDIAL	R\$ 30.000,00	D.F		RETORNO INVESTIMENTO MÊS	265,13%
18	ATUALIZAÇÃO DE SOFTWARE	R\$ 60.000,00	D.F			
	DESPESAS FIXAS	R\$ 415.896,25			DESPESAS DE INVESTIMENTOS	D.INV.
	CUSTO GLOBAL	R\$ 3.150.727,13	TOTAL		DESPESAS FIXAS	D.F

TABELA 02: Resultados de produção e faturamento para dois turnos de 08:00.

N	CUSTOS - PROJETO IND 4.0 2024	LINHA - IND 4.0	CLASSE	PRODUTO:	NOTEBOOK - DELL I7	Nº TURNOS
1	Técnicos - Fabricante dos Robôs. (Treinamento e Comissionamento)	R\$ 45.000,00	D.INV.			2
2	COBOT'S (Aquisição) X 4 UNIDADES	R\$ 1.264.830,88	D.INV.	VALOR UNITÁRIO	R\$ 972,18	
3	A.G.V (Aquisição) X 4 UNIDADES	R\$ 480.000,00	D.INV.	IND 3.0	STATUS	IND 4.0
4	FERRAMENTAS E DISPOSITIVOS	R\$ 50.000,00	D.INV.	31	PRODUÇÃO - TURNO	71
5	INTEGRAÇÃO SUPERVISÓRIO COM MÁQUINAS EQUIPAMENTO, COBOT E A.G.V	R\$ 245.000,00	D.INV.	62	PRODUÇÃO - DIA	142
6	INTEGRAÇÃO DE MÁQUINAS EQUIPAMENTO AOS COBOT'S	R\$ 190.000,00	D.INV.	1364	PRODUÇÃO - MÊS (22 DIAS)	3124
7	INTEGRAÇÃO DE PERÍMETROS DE SEGURANÇA - COBOT'S	R\$ 130.000,00	D.INV.	15004	PRODUÇÃO - ANO (11 MESES)	34364
8	INTEGRAÇÃO DE A.G.V	R\$ 88.000,00	D.INV.	R\$ 14.586.588,72	FATURAMENTO ANUAL BRUTO	R\$ 33.407.993,52
9	PISTAS PARA A.G.V	R\$ 72.000,00	D.INV.			
11	TREINAMENTO DE COLABORADORES JUNTO AO FABRICANTE DE COBOT'S	R\$ 170.000,00	D.INV.		FATURAMENTO MENSAL BRUTO	R\$ 3.037.090,32
	DESPESAS DE INVESTIMENTO	R\$ 2.734.830,88		1º MÊS	FATURAMENTO MENSAL LIQUIDO	-R\$ 349.533,06
12	ENERGIA ELÉTRICA	R\$ 72.000,00	D.F		RETORNO INVESTIMENTO MÊS	-10,32%
13	MANUTENÇÃO DA LINHA	R\$ 90.000,00	D.F			
14	OPERADORES (Salários) - R\$ 2.300 :	R\$ 22.572,90	D.F			
15	MANUTENÇÃO DOS COBOT'S (PARTES E PEÇAS)	R\$ 320.000,00	D.F	2º MÊS	FATURAMENTO MENSAL BRUTO	R\$ 3.037.090,32
16	CUSTO COM MÃO DE OBRA ESPECIALIZADA - Técnicos (Salários) - R\$ 4.000	R\$ 57.219,60	D.F		FATURAMENTO MENSAL LIQUIDO	R\$ 2.385.297,82
17	MANUTENÇÃO PREDIAL	R\$ 30.000,00	D.F		RETORNO INVESTIMENTO MÊS	365,96%
18	ATUALIZAÇÃO DE SOFTWARE	R\$ 60.000,00	D.F			
	DESPESAS FIXAS	R\$ 651.792,50			DESPESAS DE INVESTIMENTOS	D.INV.
	CUSTO GLOBAL	R\$ 3.386.623,38	TOTAL		DESPESAS FIXAS	D.F

TABELA 03: Resultados de produção e faturamento para três turnos de 08:00.

N	CUSTOS - PROJETO IND 4.0 2024	LINHA - IND 4.0	CLASSE	PRODUTO:	NOTEBOOK - DELL I7	Nº TURNOS
1	Técnicos - Fabricante dos Robôs. (Treinamento e Comissionamento)	R\$ 45.000,00	D.INV.			3
2	COBOT'S (Aquisição) X 4 UNIDADES	R\$ 1.264.830,88	D.INV.	VALOR UNITÁRIO	R\$ 972,18	
3	A.G.V (Aquisição) X 4 UNIDADES	R\$ 480.000,00	D.INV.	IND 3.0	STATUS	IND 4.0
4	FERRAMENTAS E DISPOSITIVOS	R\$ 50.000,00	D.INV.	31	PRODUÇÃO - TURNO	71
5	INTEGRAÇÃO SUPERVISÓRIO COM MÁQUINAS EQUIPAMENTO, COBOT E A.G.V	R\$ 245.000,00	D.INV.	93	PRODUÇÃO - DIA	213
6	INTEGRAÇÃO DE MÁQUINAS EQUIPAMENTO AOS COBOT'S	R\$ 190.000,00	D.INV.	2046	PRODUÇÃO - MÊS (22 DIAS)	4686
7	INTEGRAÇÃO DE PERÍMETROS DE SEGURANÇA - COBOT'S	R\$ 130.000,00	D.INV.	22506	PRODUÇÃO - ANO (11 MESES)	51546
8	INTEGRAÇÃO DE A.G.V	R\$ 88.000,00	D.INV.	R\$ 21.879.883,08	FATURAMENTO ANUAL BRUTO	R\$ 50.111.990,28
9	PISTAS PARA A.G.V	R\$ 72.000,00	D.INV.			
11	TREINAMENTO DE COLABORADORES JUNTO AO FABRICANTE DE COBOT'S	R\$ 170.000,00	D.INV.			
	DESPESAS DE INVESTIMENTO	R\$ 2.734.830,88		1º MÊS	FATURAMENTO MENSAL BRUTO	R\$ 4.555.635,48
					FATURAMENTO MENSAL LIQUIDO	R\$ 933.115,85
					RETORNO INVESTIMENTO MÊS	25,76%
12	ENERGIA ELÉTRICA	R\$ 108.000,00	D.F			
13	MANUTENÇÃO DA LINHA	R\$ 90.000,00	D.F			
14	OPERADORES (Salários) - R\$ 2.300 :	R\$ 33.859,35	D.F			
15	MANUTENÇÃO DOS COBOT'S (PARTES E PEÇAS)	R\$ 480.000,00	D.F	2º MÊS	FATURAMENTO MENSAL BRUTO	R\$ 4.555.635,48
16	CUSTO COM MÃO DE OBRA ESPECIALIZADA - Técnicos (Salários) - R\$ 4.000	R\$ 85.829,40	D.F		FATURAMENTO MENSAL LIQUIDO	R\$ 3.667.946,73
17	MANUTENÇÃO PREDIAL	R\$ 30.000,00	D.F		RETORNO INVESTIMENTO MÊS	413,20%
18	ATUALIZAÇÃO DE SOFTWARE	R\$ 60.000,00	D.F			
	DESPESAS FIXAS	R\$ 887.688,75			DESPESAS DE INVESTIMENTOS	D.INV.
	CUSTO GLOBAL	R\$ 3.622.519,63	TOTAL		DESPESAS FIXAS	D.F

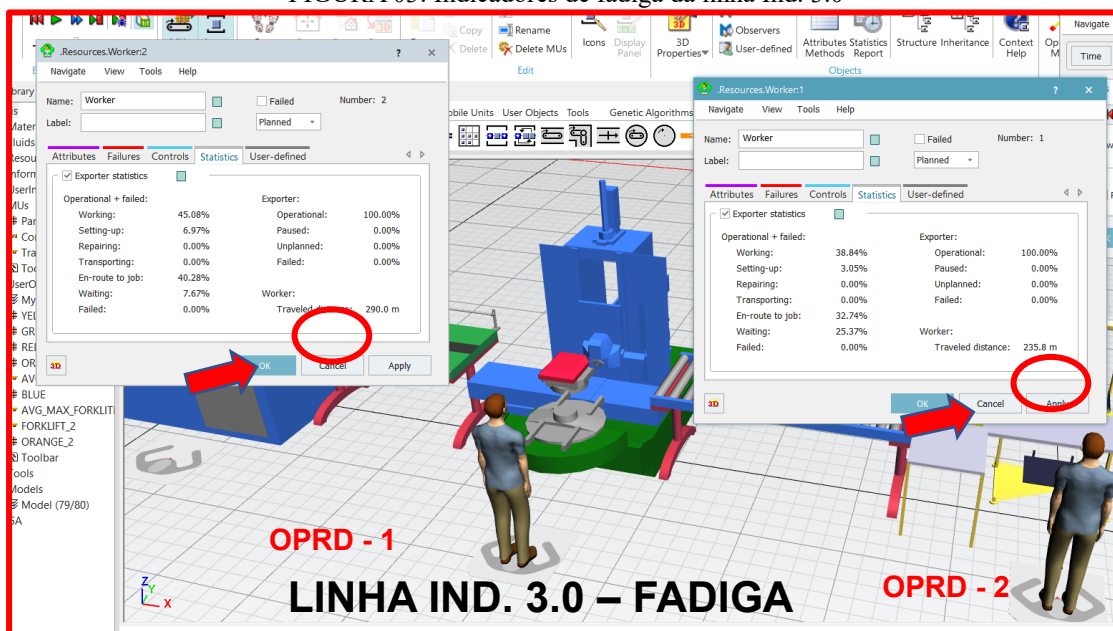
4.3 FADIGA

A **tabela 4** apresenta a distância percorrida (em metros) pelos operadores para alcançar os postos de trabalho ao longo de um turno. Os valores apontam para um considerável desgaste físico que no limite do esforço pode comprometer o tempo (ritmo) da linha e até mesmo a qualidade do produto se assim a tarefa ou o processo depender da perícia (experiência – habilidade) do operador.

TABELA 04: Distância dos deslocamentos dos colaboradores no processo, para um turno de 08 horas.

FADIGA DE DESLOCAMENTO ENTRE POSTOS				
	TURNO	CARGA HORÁRIA	L : OPRD 1	L : OPRD 2
LINHA IND. 3.0	1	8	290 m	235,8 m
LINHA IND. 4.0	1	8	4 m	6,7 m

FIGURA 03: Indicadores de fadiga da linha Ind. 3.0

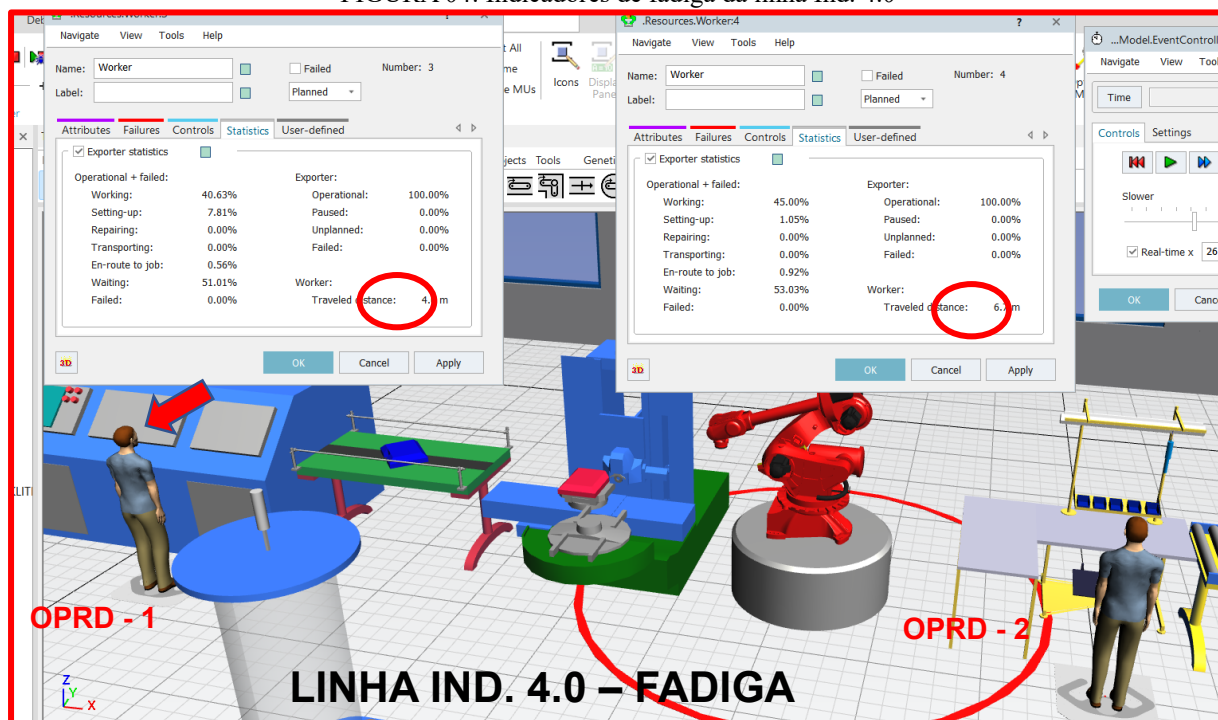


O Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho (SESMT) da empresa, tem na integridade física dos colaboradores como prioridade de suas atribuições como departamento de prevenção, assim consideraria os dados apresentados na **tabela 5, fig.3 e fig. 4** no indicador da linha da Ind. 4.0 como o cenário ideal para o conforto e qualidade do ambiente de trabalho, destacando como tal a redução dos índices (não apresentados) de afastamento de colaboradores por doenças ocupacionais, eliminação de horas extras para recuperar produção afetada por não conformidade causada pela imperícia através do desgaste físico; dessa forma impedindo novas contratações (para suprir os afastamentos) e menos custos de folha de pagamento para a empresa.

TABELA 05: Detalhamento dos deslocamentos dos colaboradores no processo, para um turno de 08 horas

FADIGA DE DESLOCAMENTO ENTRE POSTOS					
LINHAS	OPERADOR	WORKING	IEN - ROUTE TO JOB	WAITING	SETIING - UP
IND. 3.0	OPRD 1	45,08	40,28	7,67	6,97
	OPRD 2	38,84	32,74	25,37	3,05
IND. 4.0	OPRD 1	40,63	0,56	51,01	7,81
	OPRD 2	45	0,92	53,03	1,05

FIGURA 04: Indicadores de fadiga da linha Ind. 4.0



4.4 SEGURANÇA

Na combinação de dispositivos inteligentes, conectividade em tempo real e capacidade de análise de dados, nos permite empregar máquinas capazes de aprender e gerenciar sistemas a exemplo da robótica avançada na Indústria 4.0 assim os COBOTS se destacam pelo modelo de I.A capazes de monitorar seu perímetro de atuação, interagir direta ou indiretamente com humanos sem a necessidade de barreiras físicas através de seu algoritmo e suas rotinas de aprendizado.

FIGURA 05: Cobot interagindo com humano.

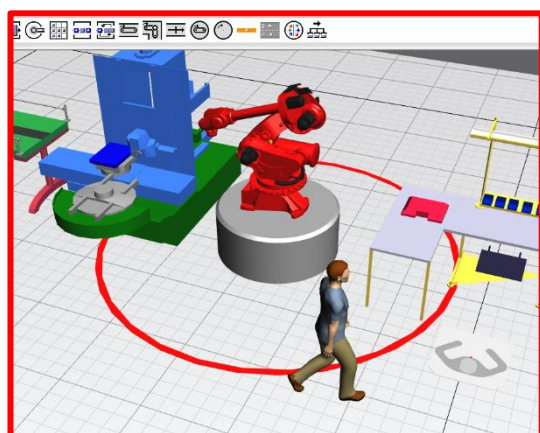
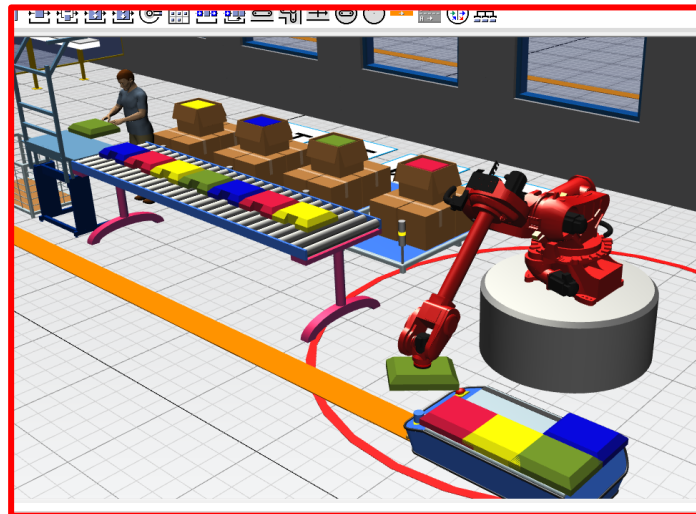


FIGURA 06: Almojarifado Ind. 3.0



FIGURA 07: Almojarifado Ind. 4.0



Com uma abordagem inicial pelo almojarifado da Indústria 3.0 (**fig. 6**) temos uma empilhadeira que é abastecida pelo colaborador que também desembala os insumos (partes e peças) para assim ser conduzido pela empilhadeira. Na **fig. 7** mostra o ambiente de almojarifado da Indústria 4.0 onde podemos observar o A.G.V sendo abastecido por um COBOT que intercala com uma esteira recebendo a matéria prima desembalada pelo colaborador. Os Robôs nesse projeto de simulação **fig.5** são os elementos que mais se destacam por sua robustez e capacidade cinemática de realizar movimentos rápidos e precisos, contando com sistemas embarcados tal como sensores de toque, visão e movimento que são os órgãos vitais para a máquina (COBOT) reconhecer os elementos que compõem em torno de seu perímetro de trabalho, capazes de interromper seu movimento ou processo quando seus dispositivos de segurança são acionados. Os A.G.V também contam com sensores embarcados capazes de interromper sua trajetória ou desviar quando um obstáculo se opõe no perímetro de tráfego pré-determinado.

A fadiga humana causada pelo esforço repetitivo também pode elevar a potencialidade de acidentes através da imperícia na execução da atividade, provocada por movimentos involuntários através de esgotamento das energias físicas e por vezes até mental. Para o cenário da Ind. 4.0 os colaboradores deixam de impor a condição física como interação no processo (agora realizada por Robôs) e participam com uso das capacidades técnicas e intelectual desenvolvidos pelos treinamentos com advento do novo processo, assim afastando os colaboradores das zonas e perímetros de risco.

5 DISCUSSÕES

O método do Gêmeo Digital através do Plant Simulation foi considerado como a ferramenta mais apropriado para análise desse projeto, motivado pela necessidade principalmente do Aumento da

Capacidade de Carga, Redução dos Custos industriais a qual desencadeou mudanças no espaço físico, Fadiga Humana, Segurança no Trabalho, Energia e até na Preservação do meio Ambiente (setor ambiental).

Avaliar a viabilidade econômica do projeto de aumento de capacidade de carga é parte desse estudo, e construir o cenário virtual da linha atual com toda a base de dados do processo é o primeiro passo a ser dado. Os testes de simulação com dados reais de processo foram realizados e foi observado a perda de velocidade da linha com elevadas taxas de tempo de espera (dos equipamentos) em função da dependência da intervenção do operador para o equipamento entrar em ciclo de trabalho conforme gráfico de padrão de cores (cinza) fig. 8 e tab. 5.

FIGURA 08: Gráfico de padrão de cores.

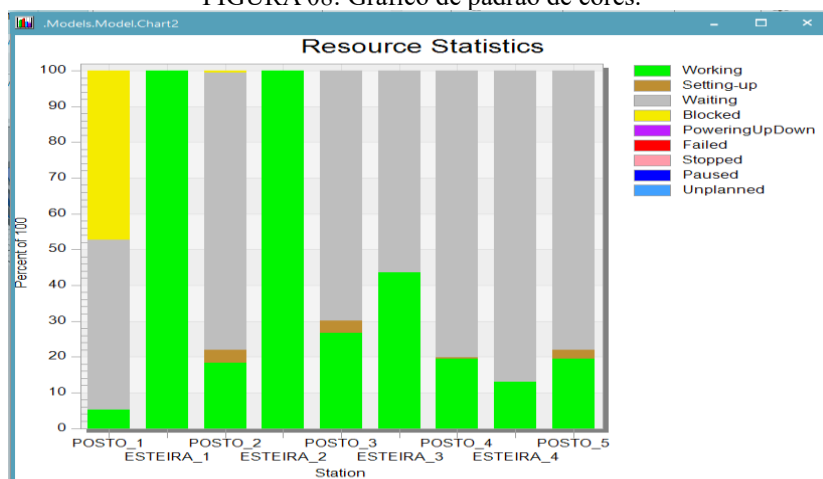


FIGURA 09: Local onde será instalado um Cobot em substituição a esteira.



Com base nesse cenário, adicionamos um Robô Colaborativo (COBOT) em uma posição do processo (fig.9) que tornasse desnecessário os deslocamentos dos operadores para realizar comando de operação em ciclo de trabalho no equipamento. Para implantar o COBOT seria necessário investir em sistemas de comando e controle e supervisorio. Assim foi construído um novo cenário virtual com

uso do método de Gêmeo Digital com aplicação dos recursos da Ind. 4.0 constituindo uma planilha de custos divididos em custos de investimentos e custos fixos (**Tab. 1**). Após ajustes na programação do Robô foi realizado a simulação, alcançando valores superiores comparado ao cenário atual.

As figuras 10 e 11 mostram os postos de abastecimento das linhas 3.0 e 4.0 respectivamente.

FIGURA 10: Posto da linha ind. 3.0

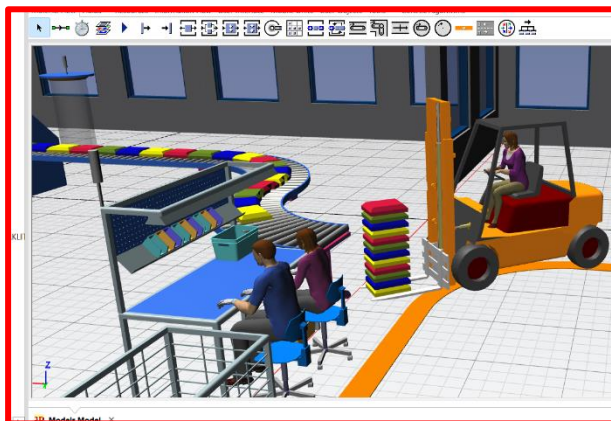
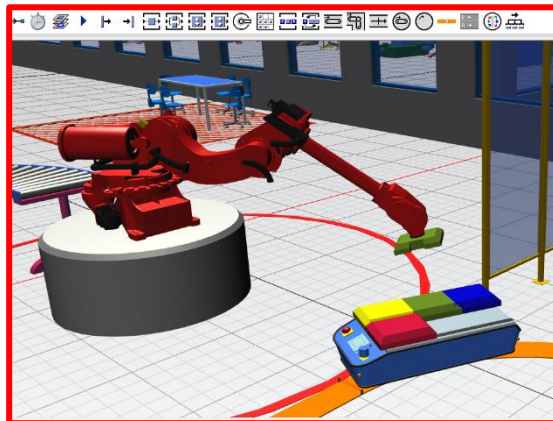


FIGURA 11: Posto da linha ind. 4.0



Na **fig. 8** também estava indicando um elevado tempo de espera e bloqueio no posto de abastecimento da linha (primeiro posto da linha) representado pela **fig. 10** onde dois colaboradores realizam o Unload da empilhadeira e o Load na esteira. Com o processo mais rápido, uma única empilhadeira se tornou insuficiente para abastecer o processo e a locação de duas empilhadeiras, atendia as entregas mas tornou o posto um gargalo para o abastecimento da linha pelos dois colaboradores, dessa forma foi simulado a operação de um Robô nesse posto (abastecimento da linha) com melhores resultados, mas a condição e disposição vertical da matéria prima na empilhadeira impedia que o abastecimento da linha fosse mais eficiente com uso do Robô, dessa forma, realizamos um teste de movimentação da matéria prima do almoxarifado até o posto de abastecimento da linha (já com COBOT) em uma unidade A.G.V, **fig. 11** dessa forma desencadeou uma alteração também no cenário do almoxarifado cujo cenário estabelecido na Ind. 3.0 conforme mostra **fig. 12** evoluiu para um ambiente de elevada automação como mostra a **fig. 13**.

FIGURA 12: Almojarifado ind. 3.0 com destaque a matéria prima em disposição vertical na empilhadeira.

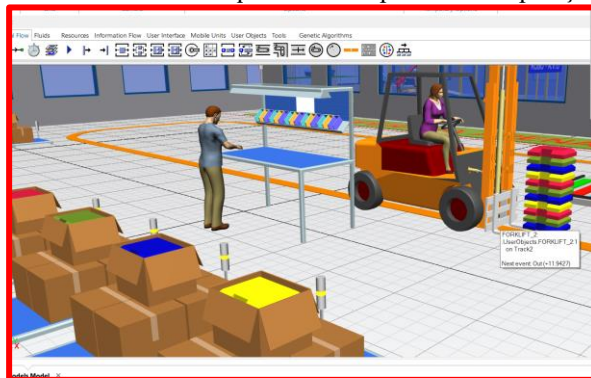
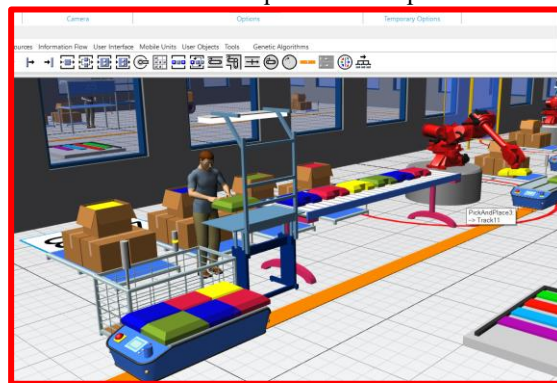


FIGURA 13: Almojarifado ind. 4.0 com destaque a matéria prima sendo conduzida por um A.G.V



Os dados de simulação para nova configuração de linha com sistemas de comando, controle e supervisão projetou 71 peças por cada turno de oito horas para o cenário da Ind. 4.0 frente as 31 peças no cenário de produção na Ind 3.0, elevando a capacidade instalada da nova linha para 129,03%.

Para uso dessas tecnologias, outros departamentos de suporte, também são necessários tal como manutenção especializada, laboratório de testes, programadores e etc.. Nesse caso a empresa deve escolher entre a condição visionária de absorver sua mão de obra excedente (substituídas por máquinas), avaliando o perfil, engajamento e capacidade de adaptação as rotinas das novas tecnologias por seus colaboradores. Para a empresa, é difícil realizar essa tarefa de escolhas pela razão de alguns postos técnicos da Ind. 4.0 demandar de capital intelectual com extensa carga horária de salas de aula, tempo esse desfavorável para a mão de obra que a empresa quer absorver. Vale pontuar que nessa fase transitória de treinamento para absorver a antiga mão de obra, novos colaboradores em regime temporário devem ser contratados para substituir temporariamente a mão de obra em treinamento.

O impacto social da estatística dos postos de trabalho humanos substituídos por máquinas, é preocupante, em função do novo profissional demandar de anos de estudo onde terá acesso à disciplinas acadêmicas voltadas para matemática, física, mecânica, elétrica, eletrônica e programação,

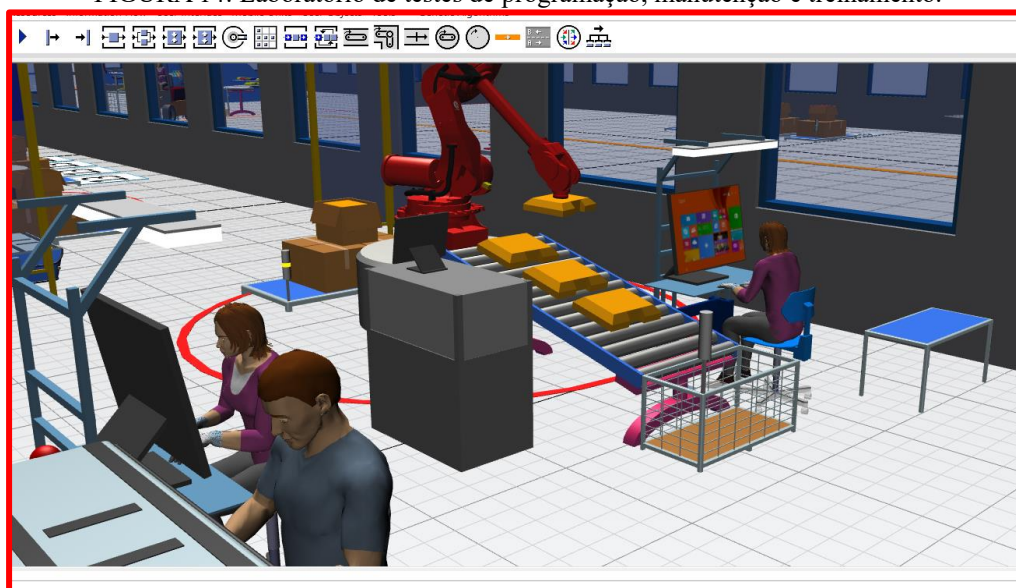
sendo essa classe de mão de obra de profissionais ainda em ascensão, torna esses profissionais muito concorridos (disputados) pelo mercado.

A análise dos custos para implementar o projeto é uma fase importante, nela será avaliado o retorno do investimento (R.O.I) e o deferimento para que a direção da empresa avance com os estágios de implementação. As despesas fixas correspondem a 15,21% das despesas de investimento, por razões estratégicas recomendamos que todos os custos de investimentos em moeda estrangeira fossem quitados até o primeiro mês de produção que precede o comissionamento da linha evitando dívidas a médio prazo que possa influenciar nos resultados financeiros, dessa forma o R.O.I seria avaliado com maior precisão já no segundo mês de produção. Avaliando as tabelas 1 – 2 os resultados são conclusivos para um faturamento mensal líquido negativo no primeiro mês com a linha operando em até dois turnos, dessa forma para alcançar faturamento mensal líquido no primeiro mês, conforme apresenta a **tab.3** serão necessários três turnos, mas o R.O.I é garantido já no segundo mês com a linha operando com apenas um único turno.

Os COBOTS são robôs colaborativos com tecnologia embarcada capaz de interagir com seres humanos através de sua plataforma de I.A que permite o aprendizado de novas rotinas em tempo real proporcionando segurança aos elementos de suas adjacências que fazem parte do cenário onde será cumprido o ciclo de trabalho. Se um robô interage com ser humano fornecendo a ele um insumo ou produto, o COBOT ao longo da carga horária de trabalho, é capaz de reconhecer a fadiga do ser humano é assim reduzir sua velocidade operacional. Podemos assim pontuar que segurança e fadiga estão interligados nos COBOTS.

Todos os anos milhares de colaboradores são afastados de seus postos de trabalho por motivos de acidentes, muitos em empresas que operam com tecnologia da Ind. 3.0, onde a fadiga física e mental certamente se destaca, desencadeando na indústria novas contratações para suprir trabalhadores afastados, aumentando os custos de folha de pagamento da indústria com contratos temporários, ao mesmo tempo que esses colaboradores afastados por um longo período, produz custos também para o erário. Com advento da aplicação das tecnologias da Ind. 4.0 os colaboradores poderão usufruir de ambientes de trabalho mais seguros e confortáveis, aplicando a mão de obra em atividades mais técnicas conforme mostra a **fig.14**.

FIGURA 14: Laboratório de testes de programação, manutenção e treinamento.



O meio ambiente também é indiretamente beneficiado pela Ind. 4.0. Para o nosso estudo de caso com os resultados da simulação, a empresa gasta menos energia elétrica produzindo mais no novo cenário no mesmo tempo ciclo do processo atual. Isso significa um menor custo na conta de energia e se a matriz energética for usinas termoeletricas, será menos carbono liberado na atmosfera, assim com a oportunidade de a empresa ingressar no processo de crédito de carbono, amplamente divulgado nos projetos de energia limpa.

O aumento da produtividade com aplicação de novas tecnologias, também deve garantir a qualidade do produto evitando assim estatísticas de não conformidades no processo e a projeção de descartes de peças não conformes seja em ambientes controlados ou no meio ambiente. Dessa forma o baixo índice de não conformidade produzido pelas indústrias que aderem as novas tecnologias, colabora com a preservação do meio ambiente, mantendo seguro a fauna e a flora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado evidenciou a viabilidade e os benefícios da implementação de tecnologias da Indústria 4.0 em processos produtivos, particularmente na transição de um modelo tradicional para um modelo automatizado com integração de robôs colaborativos. O uso de gêmeos digitais permitiu a análise detalhada de cenários simulados, identificando melhorias significativas na produtividade, redução de custos e maior utilização eficiente dos recursos.

As tecnologias emergentes, como COBOTs, apresentaram vantagens claras não apenas no aumento da capacidade de produção, mas também na melhoria das condições de trabalho, com redução da fadiga física dos operadores e maior segurança ocupacional. A aplicação de sistemas automatizados

também demonstrou impactos positivos na sustentabilidade, com menor consumo de energia e redução de desperdícios, alinhando os resultados industriais às demandas ambientais e econômicas globais.

No entanto, a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 requer desafios importantes a serem superados. Entre eles, destaca-se a necessidade de requalificação da força de trabalho, que deve se adaptar às novas demandas tecnológicas. Para garantir uma transição inclusiva e eficaz, é essencial que empresas e governos invistam em programas de educação e capacitação continuada, promovendo parcerias entre setor público e privado.

Ademais, a integração bem-sucedida dessas tecnologias depende de investimentos em infraestrutura e em sistemas ciberfísicos capazes de conectar e otimizar processos produtivos. A análise de retorno do investimento (ROI) realizada mostrou que, embora os custos iniciais possam ser elevados, os benefícios gerados, como aumento da capacidade instalada e redução de custos operacionais, justificam plenamente a adoção das soluções propostas.

Por fim, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o uso de tecnologias da Indústria 4.0 em processos produtivos, reforçando a importância de soluções inovadoras que promovam competitividade, sustentabilidade e qualidade de vida para os trabalhadores. Recomenda-se a realização de estudos futuros que explorem a integração de novas tecnologias emergentes, como inteligência artificial aplicada à gestão preditiva de processos, para potencializar ainda mais os resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM), ao ITEGAM e as empresas Salcomp, Foxconn, Procomp/Diebold, Inventus Power, Coelmatic por meio da Lei no. 8.387/1991 de Informática para incentivo a Projetos de PD&I com apoio financeiro PUR044/2023/CITS ao projeto de Mestrado através da Coordenadora do Programa Prioritário da Indústria 4.0 e Modernização Industrial, o Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS)/CAPDA/SUFRAMA/MDIC.

REFERÊNCIAS

BAUER, W.; FISCHER, L.; SCHWEIZER, K. Industry 4.0 – The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. In: German Engineering Federation (VDMA), Frankfurt, 2016.

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. A segunda era das máquinas: trabalho, progresso e prosperidade em uma época de tecnologias brilhantes. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

COOPER, R.; ELLIOTT, S.; JONES, P. Predictive Maintenance Using AI in Manufacturing. *Journal of Advanced Production*, v. 56, n. 4, p. 234–245, 2019.

FREY, C.; OSBORNE, M. O futuro do emprego: quão suscetíveis são os empregos à automação? *Revista de Estudos do Trabalho*, v. 39, n. 2, p. 123–144, 2017.

GRZYBOWSKA, K.; ŁUPICKA, A. Key Competencies for Industry 4.0. *Economics and Management*, v. 2, p. 45–52, 2017.

GROOVER, M. P. Automação, sistemas de manufatura e manufatura computacional. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2019.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. Acatech – National Academy of Science and Engineering, Munich, 2013.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18–23, 2015.

MILLER, P.; TAYLOR, J. The Impact of AI and Robotics on Future Work. *AI Perspectives*, v. 14, n. 2, p. 87–102, 2019.

NEGHBAN, A.; SMITH, J. Simulation for Manufacturing Systems Design and Operation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 41, p. 18–35, 2014.

ROSS, A. *Indústrias do futuro*. São Paulo: HSM Editora, 2010.

SMITH, A.; JOHNSON, P. Impacts of IoT in Smart Manufacturing. *Technology and Innovation*, v. 28, n. 3, p. 56–72, 2020.

SOUZA, R. M.; OLIVEIRA, J. R. *Inteligência artificial e automação: impactos no mercado de trabalho brasileiro*. São Paulo: Saraiva, 2023.

VILLANI, V.; PUCCI, M.; ZAMBELLI, C. Collaborative Robotics: Enhancing Productivity and Safety. *Journal of Robotics Research*, v. 45, n. 5, p. 201–220, 2018.

WEHNER, M.; SCHULZ, T. Collaborative Robots in Automotive Manufacturing. *Automation Insights*, v. 12, n. 1, p. 19–28, 2018.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.