


**ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA NAS
INDÚSTRIAS DE MONTAGEM DE ELETROELETRÔNICAS DO POLO
INDUSTRIAL DE MANAUS POR MEIO DO CÁLCULO DO OEE - CASO DE
ESTUDO DE AUTOMAÇÃO**

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-317>

Data de submissão: 19/11/2024

Data de publicação: 19/12/2024

Isabela Zanotto Monteiro

Eng.

Engenheira de Produção; Acadêmica 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: isabelazanottom1@gmail.com

Nelson Marinelli Filho

D. Sc.

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>

Gil Eduardo Guimarães

D. Sc.

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>

Geraldo Nunes Correa

D. Sc.

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>

Matheus Rissardi Ferreira

Bal.

Bacharel em Análise e Desenvolvimento de Sistemas; Diretor de Tecnologia na Ativecon Collaborative Economy - SP – BRASIL
E-mail: matheus@ativecon.com

RESUMO

Este estudo apresenta a implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, com ênfase no uso de Gêmeos Digitais e na automação do cálculo do OEE (Overall Equipment Effectiveness), aplicados a uma linha de montagem de placas eletroeletrônicas no Polo Industrial de Manaus (PIM).

O objetivo foi desenvolver uma solução capaz de identificar, em tempo real, os tempos e motivos das paradas produtivas, visando à otimização dos processos industriais e à redução de custos operacionais. Os dados foram coletados por meio de sensores IoT instalados nas linhas de produção, integrados a uma plataforma digital que replicou virtualmente a planta fabril em um sistema de Gêmeos Digitais. O OEE foi calculado automaticamente a partir dos três principais indicadores: Disponibilidade, Performance e Qualidade. Simulações no ambiente virtual identificaram gargalos produtivos e permitiram ações preditivas para evitar falhas e otimizar a performance das máquinas. Os resultados, obtidos ao longo de 80 dias de monitoramento, evidenciaram evolução nos indicadores de eficiência produtiva, com redução do downtime não programado, ajuste dinâmico dos parâmetros de produção e melhoria da qualidade dos produtos, impactando positivamente a sustentabilidade industrial e a eficiência energética. O estudo também discutiu desafios enfrentados, como integração com sistemas legados, qualidade dos dados coletados e capacitação técnica da equipe, cuja superação foi essencial para o sucesso da transformação digital. Conclui-se que a combinação entre Gêmeos Digitais, OEE automatizado e tecnologias da Indústria 4.0 constitui um caminho viável para a excelência operacional, contribuindo para a competitividade e sustentabilidade das indústrias do PIM.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Gêmeos Digitais. OEE. Sustentabilidade Industrial. IoT.

1 INTRODUÇÃO

A industrialização é o processo transformador dos mais significativos polos econômicos mundiais, por ampliar de forma escalar a geração de emprego às suas populações, demandar a sua capacitação contínua e especialização, agregar tecnologias inovadoras de eficiência de processos e aumentar a confiabilidade da qualidade na produção bens de consumos, como é o caso dos aparelhos eletroeletrônicos que caracterizam a Indústria da Zona Franca de Manaus, AGUIAR (2022).

As políticas estruturantes da Amazônia Ocidental têm como mais importante iniciativa a Zona Franca de Manaus (ZFM) alinhada a um complexo conjunto de leis, normas e diretrizes que a tornam o mais importante polo de desenvolvimento industrial localizado na região Norte do Brasil. Neste arcabouço se destaca a Lei de Informática da ZFM que é responsável por atrair importantes grupos industriais de atuação global, por meio de seus atributos fiscais. Especialmente, do setor de bens de consumo eletroeletrônicos: telefones móveis computadores, aparelhos domésticos e até mesmo veículos automotores, Lima, A. K. C. (2015).

Neste contexto de fomento ao desenvolvimento é muito importante as ações relacionadas à busca pela melhoria contínua da eficiência de processos, qualidade e competitividade. Por meio dos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento regulados pela SUFRAMA (Superintendência da Zona Franca de Manaus) e orientados pelo CAPDA (Comitê das Atividades de pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia), com o incentivo e implementação de projetos de cunho voltado para o desenvolvimento de produtos, processos, sistemas e tecnologias. Todos com o objetivo de fomentar a busca constante da competitividade, por meio de elevados patamares de excelência na operacionalização industrial, redução de custos e, hoje, também pela sustentabilidade,

A Indústria 4.0 é no âmbito global é uma realidade em andamento. A sua capacidade tecnológica fundamental de interconexão em Nuvem habilita o monitoramento de processos e dos seus resultados em qualquer momento e lugar e tornam possível observar detalhadamente cada espaço, componente e ação dentro de uma instalação fabril. A sua adoção trouxe aos de sistemas para a gestão de processos industriais rapidez e precisão em atividades de controle e planejamento rotineiras no dia a dia industrial, com impacto positivo inquestionável sobre as organizações que conseguiram adotá-las plenamente.

No entanto, esta capacidade ainda não é uma realidade para a grande maioria das indústrias localizadas no Polo Industrial de Manaus (PIM). A maior parte das indústrias instaladas ali trabalha diariamente com desafios constantes no planejamento de produção, impasses logísticos tanto de abastecimento quanto de escoamento, controle de qualidade e manutenção preditiva de linha produtiva, mas ainda sem as facilidades que as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem trazer

para as operações industriais e a sua gestão. Isto acontece não por falta entendimento dos benefícios, ou mesmo recursos, mas sim por dificuldades em entender como estas tecnologias podem ser alinhadas de forma assertiva para entregar os resultados necessários, dentro de limites determinados de tempo e recursos. Baseada em dados das máquinas analisados em tempo real para a interrupção da alta incidência de paradas não programadas na produção de bens de alto valor agregado, o que compromete em todos os setores da operação industrial, Balluff Brasil. (2023) e Ramos, C. A., Ribeiro, P. F., Barboza, W. S., Dias, M. J., & Alcântara, G. A. M. (2024).

Além disso, no cenário mundial atual e especialmente quando falamos de Amazônia, é imprescindível trazer para o escopo dos projetos de pesquisa e desenvolvimento industriais os atributos e características da sustentabilidade industrial que devem ser contemplados nestes processos de melhoria contínua, Almeida, O. C., Brilhante, J. C., Pinto, F. R., & Alencar, D. B. (2019). Aqui é adequado o pensamento linear de que as instalações industriais e seus equipamentos devem ser utilizados em sua capacidade máxima, de forma inteligente e até compartilhada, para reduzir desperdícios. Saber como maximizar os recursos disponíveis é uma ação de sustentabilidade vital, mas que demanda profundo conhecimento dos processos e de como monitorá-los de forma efetiva. Esta é uma demanda que pode ser muito bem atendida por meio do desdobramento do conceito de “Gêmeos Digitais”, como será explorado e desenvolvido no presente trabalho de pesquisa e desenvolvimento industrial.

Ter processos que podem ser monitorados, entendidos e melhorados é o primeiro passo para a aplicação de tecnologias limpas, porque esta classe de transformação do ambiente industrial demanda a adoção de iniciativas que sejam capazes de planejar, tanto internamente quanto no contexto macro, a integração dos espaços físicos, das pessoas e dos equipamentos coisas, Li, H., Pangborn, H. C., & Kovalenko, I. (2023).

Este nível de integração, característico da Indústria 4.0, é capaz de transformar os processos de trabalho, mas apenas se for simplificado para a interação humana utilizando métricas acuradas de desempenho em tempo real. Estas métricas, invariavelmente, são de cálculo complexo e até hoje eram analisadas a posteriori. Isto anulava a sua importância, quase que completamente, e as relegava a ilustrações de trabalhos gerenciais que tinham pouca chance de serem implementados. A utilização das tecnologias digitais para análise de altos volumes de dados, utilizando recursos, mesmo que simples de inteligência de máquina, permitem automação do cálculo de métricas de desempenho como o OEE (Overall Equipment Effectiveness), McKinsey & Company. (2023) e NVIDIA Corporation. (2023).

Neste trabalho será explorado este caminho de solução para a difusão das capacidades da Indústria 4.0 como discutido, que já podem ser acessadas sem investimentos de recursos impeditivos

pela maioria das indústrias do PIM, explorando o conceito de gêmeos digitais no caso de uma planta produtiva automatizada em uma indústria de eletroeletrônicos (setor de alta prevalência do PIM), capaz de identificar de forma acurada os tempos e motivos de suas interrupções de produção (“paradas”).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A EVOLUÇÃO DO OEE E SUA IMPORTÂNCIA NA INDÚSTRIA 4.0

O OEE (Overall Equipment Effectiveness) é uma métrica central para medir a eficácia dos equipamentos industriais. Ele avalia três componentes fundamentais: Disponibilidade (tempo de operação dos equipamentos), Performance (capacidade dos equipamentos em atingir sua velocidade máxima) e Qualidade (proporção de produtos que atendem aos padrões estabelecidos). Este conceito emergiu ao longo das quatro Revoluções Industriais, sendo continuamente aperfeiçoado para atender às demandas de um ambiente produtivo cada vez mais complexo e tecnológico (HANSEN, 2022).

2.1.1 OEE e as Revoluções Industriais

2.1.1.1 1ª Revolução Industrial (Séculos XVIII e XIX)

Durante este período, a introdução da máquina a vapor revolucionou a produção, substituindo processos artesanais por mecanizados. Embora o OEE ainda não existisse formalmente, a ideia de maximizar a eficiência das máquinas era um foco crescente. O objetivo principal era minimizar as falhas e o tempo de inatividade, priorizando a manutenção regular.

- Disponibilidade: O tempo de operação das máquinas a vapor era essencial para manter a produção ativa. Paradas inesperadas causavam grandes impactos na produtividade (HANSEN, 2022).
- Performance e Qualidade: Embora não fossem medidas formalmente, havia esforços para aumentar a velocidade das máquinas e produzir bens aceitáveis, ainda que de forma rudimentar (HANSEN, 2022).

2.1.1.2 2ª Revolução Industrial (Século XIX - Início do Século XX)

Com a eletricidade e o motor de combustão interna, a produção em massa e as linhas de montagem ganharam destaque. Métodos de gestão científica, como os propostos por Frederick Taylor, introduziram estudos de tempos e movimentos, padronizando processos e ampliando a atenção à eficiência operacional.

- Disponibilidade: A manutenção das linhas de montagem foi aprimorada para garantir operações contínuas (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).
- Performance: Houve um avanço significativo na redução de movimentos desnecessários e no aumento da velocidade das máquinas, (HANSEN, 2022).
- Qualidade: Tornou-se vital garantir que os produtos atendessem aos padrões para evitar retrabalhos e desperdícios, (HANSEN, 2022).

Esses avanços trouxeram os primeiros indícios do que viria a se formalizar como OEE, com uma visão mais integrada da eficiência produtiva.

2.1.1.3 3ª Revolução Industrial (Meados do Século XX - Início do Século XXI):

A automação industrial e as tecnologias digitais transformaram a produção. Computadores e sistemas de controle permitiram o monitoramento em tempo real, enquanto abordagens como Lean Manufacturing e Manutenção Produtiva Total (TPM) popularizaram o uso do OEE.

- Disponibilidade: A automação permitiu práticas de manutenção preditiva, reduzindo falhas inesperadas (MOURTZIS; VLACHOU; MILAS, 2016).
- Performance: Sistemas digitais ajustaram a velocidade das máquinas com maior precisão, otimizando a produção (PEREIRA; ROMERO, 2017).
- Qualidade: Controles automatizados reduziram drasticamente a ocorrência de defeitos, garantindo consistência (PEREIRA; ROMERO, 2017).

O OEE tornou-se uma métrica amplamente adotada, permitindo que empresas monitorassem e melhorassem continuamente suas operações.

2.1.1.4 Indústria 4.0 (Século XXI)

A Indústria 4.0 trouxe avanços como IoT, Big Data, Inteligência Artificial (IA), Machine Learning (ML) e Gêmeos Digitais, elevando o papel do OEE para um nível preditivo e em tempo real. Essas tecnologias conectaram todos os aspectos da produção, proporcionando insights precisos e ações automatizadas (PORTER; HEPPELMANN, 2014)

- Disponibilidade: Sensores IoT monitoram equipamentos continuamente, enquanto IA prevê falhas antes que ocorram (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).
- Performance: Algoritmos ajustam parâmetros em tempo real, maximizando a eficiência (MOURTZIS; VLACHOU; MILAS, 2016).

- Qualidade: Simulações com Gêmeos Digitais antecipam problemas, garantindo altos padrões de qualidade (FENZA et al., 2020).

A integração dessas tecnologias consolidou o OEE como uma métrica indispensável na gestão moderna.

2.2 OEE E AS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 conecta sistemas físicos e digitais, permitindo análises em tempo real e decisões automatizadas. O OEE, que historicamente era calculado manualmente, evoluiu para um indicador dinâmico, ajustado automaticamente com base em dados coletados por sensores e processados por IA (ARORA; PANDEY; KUMAR, 2019).

2.2.1 Aplicações de IA e ML no Monitoramento do OEE

2.2.1.1 Previsão de Falhas

Os recursos atuais de IA, já amplamente disponíveis nos componentes de automação de suas linhas de produção e sua conectividade, são capazes de prover a análise de significativos conjuntos de dados históricos e em tempo real. Isto torna a análise de regressão das variáveis de monitoramento confiável em um nível que se torna possível passar a se prever falhas iminentes de equipamentos e processos, a partir de observações mínimas (STOLZ; LORENZ; FISCHER, 2024). Além das estratégias de tempo real, também se torna possível a aquisição de e construção de algoritmos específicos para a identificação de padrões que indicam degradação de equipamentos, permitindo manutenções preventivas assertivas e, conseqüente, alcançar benefícios que eram considerados intangíveis: máxima utilização de equipamento, monitoramento do ciclo de vida etc.

2.2.1.2 Otimização Contínua

O nível de robustez dos componentes de automação na Indústria 4.0 permite que os conceitos de Machine Learning possam ser implementados como metodologias de trabalho contínuas, ou seja, incorporadas às rotinas de trabalho de produção e, não mais, como estudos posteriores dos dados de produção (CLEARPEAKS, 2023). Isto começa a tornar realidade a capacidade de se ajustar automaticamente parâmetros de produção: velocidade de corte, posicionamento, cotas de referência, temperatura, ou seja, qualquer parâmetro além dos materiais de produção. Esta capacidade traz a maximização da qualidade de processos, tornando os níveis de processos de produção demandados

cada vez mais elevados. Essa análise dinâmica garante que os equipamentos operem em sua capacidade ideal (OEE: CALCULANDO, 2023).

2.2.2 Gêmeos Digitais e o OEE

O conceito de Gêmeos Digitais é simples: a construção de réplicas virtuais que representam em tempo real o funcionamento, o desempenho e a interação de equipamentos, linhas e células de produção. O nível de automação e monitoramento atual destes sistemas tornam possível o desdobramento de estratégias de monitoramento, simulação e otimização em um nível inédito na história da Revolução Industrial, mas tornam a construção destes ambientes digitais cada vez mais complexa (GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA 4.0, 2023). Principalmente se observados apenas a partir do referencial do mais alto nível tecnológico de interação humana, como VR e AR (Realidade Virtual e Aumentada), e não nos níveis pragmáticos de aplicação com alto nível de retorno (custo-benefício), mas com nível menor de impacto visual. O presente trabalho vai exatamente na segunda alternativa, em uma tentativa de demonstrar que aplicações pragmáticas da tecnologia podem trazer retornos significativos à qualidade do trabalho industrial, em todos os seus atributos e características.

Mas a busca pela máxima utilização da tecnologia não pode ser descartada neste caso, porque a integração dos ambientes de Gêmeos Digitais à capacidade de análise da IA e de identificação de padrões do ML tem o potencial de transformar o trabalho industrial de forma profunda, por meio das seguintes estratégias:

2.2.2.1 Simulações

Testar e avaliar condições de trabalhos, em diferentes cenários e configurações, antes de implementar mudanças no ambiente real. Isto facilita o processo de escolha de alternativas e a tomada de decisões com riscos controlados.

2.2.2.2 Monitoramento

Observar constantemente as variáveis de trabalho, sintetizando-as em indicadores chaves de processos (KPIs) e ordenando a sua evolução no tempo dentro de limites pré-estabelecidos (CpK), em ambientes amigáveis e até imersivos facilitam o entendimento do impacto de cada variável no desempenho global dos processos e, conseqüentemente, a detecção de potenciais falhas e o ajuste acurado dos parâmetros de trabalho. Tudo isso em tempo real (GÊMEOS DIGITAIS E DA INDÚSTRIA 4.0, 2023).

2.2.2.3 Qualidade

A capacidade de simular alternativas e de monitorar seu desempenho em tempo real tem como resultado direto a melhoria da estabilidade dos processos, pois cada um dos desvios naquilo que foi planejado pode ser identificado, avaliado e corrigido. Isto em termos reais leva à diminuição das variações de processo e, conseqüentemente na elevação dos níveis de qualidade.

Este conjunto pode ser considerado o tripé fundacional da busca pela melhoria contínua, sob os paradigmas da Indústria 4.0.

2.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS NA INDÚSTRIA

Pragmaticamente, o principal benefício da implementação do OEE na indústria de manufatura é a capacidade de observar a eficiência real das máquinas e gerenciar adequadamente o parque de máquinas. Além disso, o monitoramento do OEE permite a identificação e eliminação de tempos de inatividade e falhas, o que se traduz diretamente em redução de custos e aumento da eficiência da produção.

A implementação do OEE abre caminho para mais inovações na Indústria 4.0, como sistemas de rastreabilidade, que permitem um gerenciamento ainda mais preciso da produção e da qualidade do produto. Graças à infraestrutura implementada para monitorar o OEE, é fácil estender a funcionalidade para módulos adicionais, como leitores de código de barras, que permitem o rastreamento de lotes específicos de produtos.

A implementação do indicador OEE é um passo fundamental no caminho para a implementação dos princípios da Indústria 4.0. Em busca destes benefícios diversos setores da indústria de manufatura estão implementando estratégias e estruturas inovadoras de monitoramento, cálculo e análise do OEE, como por exemplo:

2.3.1 Automotiva

Empresas automotivas de ponta, como BMW investem de forma robusta e consistente no desenvolvimento de soluções de monitoramento da disponibilidade, performance e qualidade de suas linhas de montagem e buscam por meio de IA ampliar a efetividade de seus processos de manutenção preditiva.

A digitalização é o facilitador da transformação para a BMW iFACTORY. Inovações de virtualização, inteligência artificial (IA) e ciência de dados permitem que o BMW Group conecte todos os aspectos relevantes da produção automotiva e use essas inovações para projetar aplicativos eficazes na produção. O resultado: máxima transparência de dados, o que torna possível o design de

processos digitais altamente eficaz. "As possibilidades estão crescendo rapidamente - e estamos aproveitando-as", diz Milan Nedeljkovic. "Com a digitalização, estamos alcançando uma nova dimensão de consistência de dados em toda a cadeia de valor e em todas as cadeias de processo." Os aplicativos podem ser implementados em qualquer local de produção, uma vez desenvolvidos.

2.3.2 Eletrônica

As empresas líderes no desenvolvimento de tecnologias para automação, como a Foxconn têm investido cada vez mais na busca de soluções de integração da IoT (sensores) e estratégias de IA e ML, para intensificar a capacidade de previsão de falhas, ajuste de processos e garantia do desempenho de produção (capabilidade).

“Advanced manufacturing, supported by Industrial AI, is going to revolutionize how manufacturers compete in the global economy, upgrade skills, create jobs, and onshore business to the United States. - Keyi Sun, Head of FOXCONN iAI”, (FOXCONN INDUSTRIAL INTERNET, acesso 12.2024).

Alimentícia: Inegavelmente a indústria alimentícia é uma das principais orquestradoras de todas as economias e com capacidade de investimento significativa, sobretudo com empresas que ocupam o lugar da Coca-Cola na sua cadeia de valor (processamento de alimentos).

A tecnologia de Gêmeos Digitais (Digital Twin) representa um avanço significativo, fornecendo um modelo virtual preciso das linhas de produção. Essa representação digital oferece insights em tempo real e análises preditivas, revolucionando a tomada de decisão com melhorias na eficiência, baseadas em dados, e redução de custos. Para diminuir a dependência de fornecedores, a empresa adotou a impressão 3D para produção de peças de reposição, com 386 designs implementados em 11 plantas. Essa iniciativa gerou economias substanciais, reduziu prazos de entrega e melhorou a disponibilidade das linhas de produção”, COCA-COLA HELLENIC BOTTLING COMPANY, acesso 12 de 2024”.

Estas declarações de empresas líderes, no cenário global da Indústria 4.0, demonstram a importância crescente que o seu arcabouço tecnológico está adquirindo, até mesmo com relação aos temas de sustentabilidade. Em todas a garantia da disponibilidade dos equipamentos demonstra como o OEE se tornou uma métrica central em setores que demandam alta eficiência e precisão.

2.4 BENEFÍCIOS E DESAFIOS

Ao implementar a inteligência artificial (IA) na manufatura, os principais benefícios incluem o aumento da precisão por meio de análises em tempo real e a redução de erros humanos, economias

de custos devido à manutenção preditiva que minimiza paradas inesperadas, e a melhoria da qualidade por meio de sistemas automatizados consistentes. No entanto, desafios como a integração com sistemas legados em fábricas mais antigas, a garantia da qualidade dos dados para análises precisas e a necessidade de treinamento substancial para desenvolver uma força de trabalho qualificada para operar tecnologias avançadas também são significativos.

2.4.1 Benefícios

2.4.1.1 Maior Precisão

Os algoritmos de IA podem analisar dados com precisão superior à humana, resultando em insights e decisões mais confiáveis. Conforme destacado por Stackpole (2023), a IA pode monitorar e melhorar o controle de produção e qualidade nas fábricas, aumentando a precisão das operações.

2.4.1.2 Redução de Custos

A manutenção preditiva, viabilizada pela IA, permite reparos proativos antes de falhas nos equipamentos, minimizando o tempo de inatividade e os custos associados. De acordo com a McKinsey & Company (2023), ferramentas de IA centradas em dados podem acelerar a remediação da qualidade dos dados com níveis aumentados de automação, contribuindo para a redução de custos.

2.4.1.3 Melhoria da Qualidade

Verificações automatizadas de qualidade utilizando IA podem identificar defeitos em tempo real de forma consistente, prevenindo que produtos defeituosos cheguem aos clientes. A integração de tecnologias de IA na manufatura tem potencial para transformar as operações, melhorando a qualidade e a eficiência dos processos produtivos.

2.4.2 Desafios

2.4.2.1 Integração com Sistemas Legados

A integração de sistemas de IA com equipamentos antigos pode ser complexa e exigir modificações significativas. A adoção de IA na manufatura enfrenta desafios, incluindo a necessidade de integrar novas tecnologias com sistemas de produção existentes.

2.4.2.2 Qualidade dos Dados

Dados imprecisos ou incompletos podem levar a análises não confiáveis e decisões inadequadas. A qualidade dos dados é um fator crítico para o sucesso de iniciativas de IA na manufatura, sendo essencial para análises precisas e tomadas de decisão eficazes.

2.4.2.3 Necessidade de Treinamento

A implementação de tecnologias avançadas de IA exige uma força de trabalho qualificada, o que pode demandar investimentos significativos em treinamento. A transformação digital na manufatura requer o desenvolvimento de habilidades específicas, incluindo a capacitação de trabalhadores para operar e manter sistemas baseados em IA.

Todos estes desafios são muito bem discutidos em VIAL et al., (2020).

Este texto demonstrou que o OEE evoluiu de uma preocupação rudimentar com a disponibilidade das máquinas na 1ª Revolução Industrial para uma métrica preditiva e automatizada na era da Indústria 4.0. Sua integração com tecnologias como IoT, IA, ML e Gêmeos Digitais tornou-o indispensável para a competitividade e a sustentabilidade industrial. Agora, na Indústria 4.0, o OEE não é apenas um indicador operacional, mas uma ferramenta estratégica para identificar oportunidades, otimizar processos e garantir padrões elevados de qualidade.

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

O estudo foi realizado em uma indústria de montagem de placas para notebooks e computadores localizada no Polo Industrial de Manaus (PIM). A produção desse tipo de componente exige processos rigorosos, com baixa tolerância a falhas, o que torna essencial a adoção de tecnologias que otimizem a eficiência produtiva. O objetivo central foi automatizar o cálculo do OEE (Overall Equipment Effectiveness) por meio de sensores integrados a uma plataforma de Internet das Coisas (IoT) e Gêmeos Digitais.

O OEE é calculado a partir de três variáveis principais:

- Disponibilidade (tempo efetivo de operação da linha),
- Performance (taxa de produção em relação à capacidade teórica) e
- Qualidade (percentual de produtos sem defeitos).

O estudo foi dividido em etapas: coleta de dados em tempo real, automação do cálculo do OEE, simulação de cenários e validação dos resultados.

3.2 COLETA DE DADOS EM TEMPO REAL

3.2.1 Sensores e Infraestrutura

A coleta de dados foi realizada por sensores de movimento, temperatura e umidade instalados estrategicamente ao longo de três linhas SMT (Surface-Mount Technology);

3.2.2 Sensores de Movimento:

Monitoraram o ciclo de produção de cada placa; e

3.2.3 Sensores de Temperatura e Umidade

garantiram as condições ideais para a integridade dos componentes.

Os sensores foram integrados à plataforma Siemens MindSphere, utilizando protocolos de comunicação como MQTT para transferência rápida dos dados. A plataforma possibilitou a visualização remota das métricas em tempo real através de um sistema de Gêmeos Digitais, que replicava virtualmente a linha de produção.

3.2.4 Andon Board e Monitoramento de Downtime

A ferramenta Andon Board foi utilizada para registrar eventos críticos, como paradas não programadas (downtime), capacidade produtiva real e qualidade obtida. O registro incluía a duração das paradas, a descrição do problema e as ações corretivas implementadas.

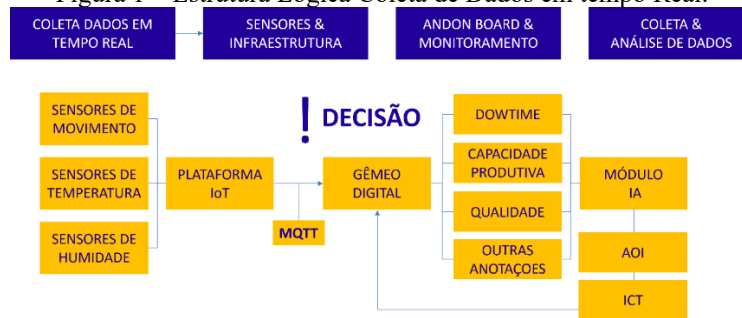
Com os dados do Andon Board, o sistema de Gêmeos Digitais, integrado a módulos de Inteligência Artificial (IA), identificou padrões de falhas repetitivas e sugeriu ações proativas para a equipe de Engenharia.

3.2.5 Ciclo de Coleta e Análise

A coleta dos dados ocorreu em intervalos definidos, iniciando com a passagem das placas pela primeira máquina equipada com sensores. Foram monitoradas variáveis como: tempo de ciclo, temperatura, umidade e ocorrências de downtime.

Os dados alimentaram o sistema de Gêmeos Digitais, permitindo que os operadores acompanhassem em tempo real o status das linhas e tomassem decisões rápidas baseadas nas condições operacionais. A Figura 1, mostra na forma de blocos lógicos a estrutura de Coleta de Dados em Tempo Real.

Figura 1 – Estrutura Lógica Coleta de Dados em tempo Real.



As inspeções automatizadas AOI (Automatic Optical Inspection) e ICT (In-Circuit Test) complementaram o monitoramento, permitindo a automação do cálculo do OEE, detectando falhas de montagem e funcionais precocemente, o que minimizou retrabalhos.

3.3 AUTOMAÇÃO DO CÁLCULO DO OEE

O OEE foi automatizado a partir da integração das variáveis capacidade, qualidade e disponibilidade em um sistema centralizado. A cada nova coleta de dados, o OEE era recalculado, fornecendo uma visão precisa e atualizada da eficiência produtiva.

3.3.1 Capacidade de Produção

A capacidade foi monitorada com base no UPH (Unidades por Hora), utilizando sensores de movimento para contabilizar as placas produzidas. A comparação com a meta teórica permitiu identificar gargalos e ajustar a produção.

3.3.2 Qualidade do Produto

A qualidade foi avaliada em duas etapas principais: AOI, que identifica problemas na montagem dos componentes e ICT, que analisa a funcionalidade elétrica das placas.

Os dados coletados ajudaram a ajustar os processos, garantindo que os produtos finais atendessem às exigências de qualidade.

3.3.3 Disponibilidade da Linha

A disponibilidade foi medida a partir dos registros de downtime. Cada parada era registrada com sua duração e causa, permitindo uma análise detalhada e a implementação de ações para reduzir as interrupções não programadas.

3.4 SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

3.4.1 Simulação com Gêmeos Digitais

Os Gêmeos Digitais permitiram a simulação de cenários produtivos sem interferência no chão de fábrica. Variáveis como: aumento de demanda, falhas de máquinas, e mudanças nos processos foram testadas para prever os impactos na produção.

3.4.2 Validação dos Dados

Os dados gerados nos cenários simulados foram comparados com os dados reais coletados diretamente das máquinas. Essa validação assegurou que o sistema de Gêmeos Digitais representava com precisão as condições da linha de produção, conferindo confiabilidade ao processo. A Figura 2 mostra esquematicamente a estrutura lógica da Automação do Cálculo do OEE.

Figura 2 – Estrutura Lógica Estabelecida para a Automação do Cálculo do OEE.



A Figura 3 apresenta sequencialmente as operações da linha de produção, com cada estação identificada por seu equipamento principal de trabalho (“máquina”), descrição, layout e as variáveis que são monitoradas.

Figura 3 – Estrutura de monitoramento e simulação.

SIMULAÇÃO & VALIDAÇÃO		LINHA DE PRODUÇÃO SMT	
		SMT → PRAFE 9 → COLA automática → SPI → Montadora C → ADO-A → Montadora T → PRC-ADO → FORNO → ADO-B → AGULHE 8 → ICT	
Máquina	Descrição	Descrição de layout	Parâmetros
SMT (Storage Management Unit)	Gerenciamento de componentes, incluindo armazenamento e transporte até a linha de produção.	Omniscient em sua fábrica e base do SMT, onde é armazenado e gerenciado.	(1) Temperatura e umidade de armazenamento: Condições ambientais que podem afetar a qualidade dos componentes eletrônicos. (2) Precisão na localização dos componentes: Evitar erros de posicionamento que possam afetar o processo de montagem. (3) Manutenção do equipamento transportador: Manutenção de rodas, trilhos ou ACVs (Automated Guided Vehicles) usados na logística interna.
Printer	Impressora de pasta de solda para aplicar a pasta de solda nos pads do PCB.	As PCBs são transportadas para a impressora de pasta de solda (Printer) e seguita para a aplicação de colas automática.	(1) Espessura da camada de solda: A espessura de soldagem deve estar em conformidade com as especificações. (2) Alinhamento de PCB: Preciso para garantir a aplicação correta da pasta de solda. (3) Velocidade de aplicação de solda: Deve ser controlada para garantir a precisão da aplicação. (4) Velocidade e pressão da impressão: Devem ser ajustadas para a descrição da placa e da pasta de solda. (5) Precisão da taxa de aplicação: Alinhamento correto entre a cabeça de aplicação e PCB. (6) Tempo de cura da solda: Pode ser afetado por variações de temperatura.
Cola automática	Aplicadora de cola automática para fixação de componentes e para soldagem de componentes que serão soldados em ondas.		(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
SPI (Order Part Inspection)	Inspeção de pastas de solda para garantir a qualidade da aplicação.	A pasta de solda após a aplicação é inspecionada para garantir a qualidade antes da montagem dos componentes.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
Montadora 1 (Pick and Place)	Máquina de montagem superficial para colocar os componentes a PCB no tabuleiro de placas.	Os componentes são colocados na PCB na Montadora 1, seguidos por uma inspeção inicial no ADO-A. Se necessário, a Montadora 1 complementa a montagem.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
ADO-A (Automated Optical Inspection - A)	Inspeção óptica automática para verificar a colocação dos componentes após a primeira montagem.	As validas são inspecionadas no ADO-A.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
Montadora 2 (Pick and Place- Complementar)	Montadora complementar, caso necessário, para adicionar componentes que não foram colocados na primeira máquina de pick and place. Nesse caso utilizado para montar os componentes PCB no verso superior da placa.	Os componentes são colocados na PCB na Montadora 2, seguidos por uma inspeção inicial no ADO-A. Se necessário, a Montadora 2 complementa a montagem.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
SPI (Order Part Inspection)	Inspeção de pastas de solda para garantir a qualidade do trabalho.	A pasta de solda após a aplicação é inspecionada para garantir a qualidade antes da montagem dos componentes.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
Montadora 3 (Pick and Place)	Máquina de montagem superficial para colocar os componentes na PCB no tabuleiro de placas.	Os componentes são colocados na PCB na Montadora 3, seguidos por uma inspeção inicial no ADO-A. Se necessário, a Montadora 3 complementa a montagem.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
ADO-A (Automated Optical Inspection - A)	Inspeção óptica automática para verificar a colocação dos componentes após a primeira montagem.	As validas são inspecionadas no ADO-A.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
Montadora 4 (Pick and Place- Complementar)	Montadora complementar, caso necessário, para adicionar componentes que não foram colocados na primeira máquina de pick and place. Nesse caso utilizado para montar os componentes PCB no verso superior da placa.	Os componentes são colocados na PCB na Montadora 4, seguidos por uma inspeção inicial no ADO-A. Se necessário, a Montadora 4 complementa a montagem.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.
ICT (In-Circuit Test)	Teste in-circuit para verificar a funcionalidade elétrica das placas.	Finalmente, as PCBs passam por testes elétricos para garantir sua funcionalidade.	(1) Precisão da câmera: Qualidade da imagem óptica depende da precisão e resolução da câmera. (2) Configuração do software de inspeção: Parâmetros de tolerância e critérios de aceitação. (3) Alinhamento de PCB durante a inspeção: Desvios podem causar erros de inspeção. (4) Iluminação: Iluminação inadequada pode afetar a qualidade da inspeção. (5) Precisão no posicionamento dos componentes: Crítico para evitar problemas de soldagem. (6) Calibração das fontes de sucção: Deve ser realizada para garantir a coleta adequada dos componentes. (7) Manutenção da aplicação: Atualizada para evitar falhas ou danos aos componentes. (8) Manutenção do alimentador de componentes: Alimentadores mal ajustados podem causar falhas no transporte.

Toda esta construção permitiu o início da implementação de cálculo automatizado do OEE e a consolidação da base de dados para o início de simulação por meio de ambiente de “Gêmeos Digitais”.

4 RESULTADOS

O primeiro momento de implementação da solução proposta passou pelas etapas de teste e estabilização de todo o sistema de coleta de dados, integração e validação dos dados, passando por momentos iniciais de alta variabilidade e chagando até a ordenação clara de prioridade de atenção. A Figuras 4 e 5 mostram estes dois momentos.

Figura 4 – Momentos iniciais da implementação do sistema de monitoramento e automação do cálculo do OEE.

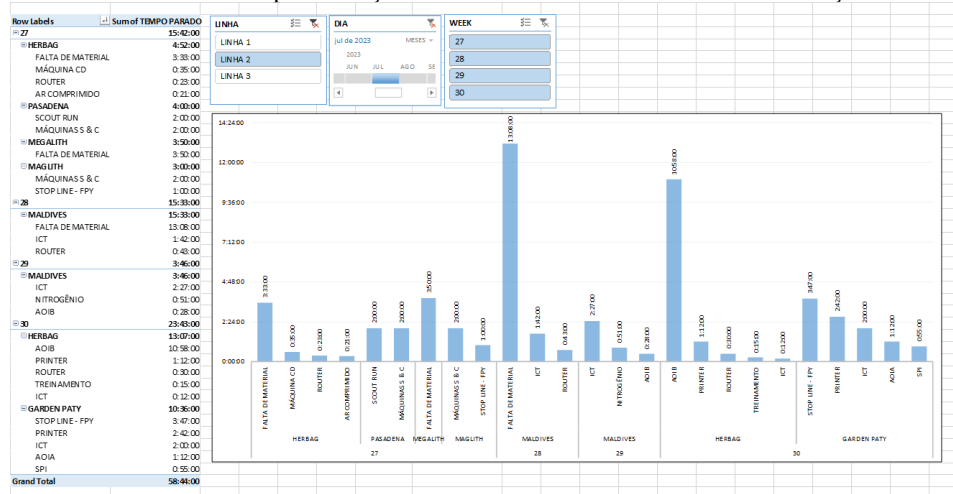
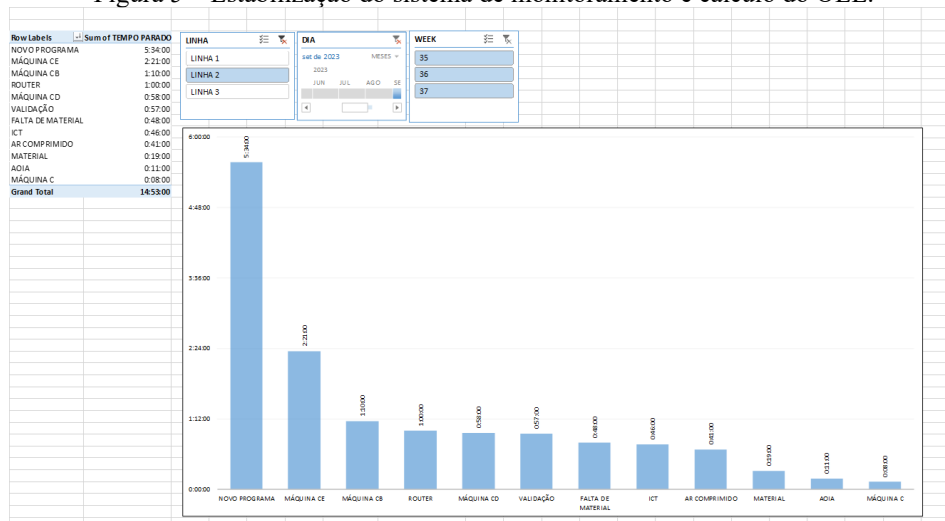


Figura 5 – Estabilização do sistema de monitoramento e cálculo do OEE.



Ao longo de dois meses de desenvolvimento o monitoramento de toda a linha, como detalhado no item 3 deste artigo permitiu o treinamento de todo o arcabouço de análise e automação de decisão, como apresentado nas Figuras 1 e 2. Este processo se desenvolveu entre os dias 1º de outubro e 11 de dezembro de 2024.

As figuras 6 e 7 mostram o ambiente de “Gêmeo Digital” da estrutura de monitoramento e simulação detalhada na Figura 3. No dia 10 de outubro de 2024 para cada processo e horário já havia, a partir dos dados coletados inicialmente, uma simulação dos parâmetros que poderiam ser alcançados. As metas não alcançadas são indicadas visualmente pela cor vermelha. É claro o descompasso entre as metas estabelecidas e os resultados alcançados em 1º de Outubro de 2024, observado estes indicadores, apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Ambiente de “Gêmeo Digital” para a linha de montagem modelada (placas eletrônicas de notebooks e carregadores), em 1º de outubro de 2024.



Na Figura 7 é apresentado o mesmo painel, mas agora depois de todo o trabalho de supervisão, depuração dos modelos e ajuste de projetos ao longo dos quase 80 dias de desenvolvimento (1º de outubro a 11 de dezembro de 2024).

Figura 7 – Ambiente de “Gêmeo Digital” para a linha de montagem modelada (placas eletrônicas de notebooks e carregadores), em 11 de dezembro de 2024.



A operação do estado destes dois painéis, Figuras 6 e 7, mostra a clara evolução da capacidade da linha em atender as metas de OEE estipuladas.

A visualização dos mais de 80 painéis de evolução desta jornada são uma fonte rica de indicativos e disparadores de melhorias do processo, que foram utilizados para a sua otimização de desempenho. Mas que serão apresentados e discutidos em trabalhos futuros.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a eficácia da implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, com destaque para os Gêmeos Digitais e o cálculo automatizado do OEE (Overall Equipment Effectiveness), na otimização de processos produtivos em uma linha de montagem de placas eletroeletrônicas no Polo Industrial de Manaus (PIM).

5.1 ALINHAMENTO COM OS OBJETIVOS INICIAIS

O objetivo central do trabalho foi implementar uma solução que possibilitasse identificar, em tempo real, os tempos e motivos de paradas de produção através da automação do cálculo do OEE e uso de Gêmeos Digitais. Os resultados alcançados ao longo dos 80 dias de monitoramento (Figuras 6 e 7) comprovam o sucesso dessa abordagem, especialmente na redução das interrupções não programadas e na melhoria da eficiência produtiva da linha.

No início do estudo, os indicadores de OEE apresentaram um descompasso significativo entre as metas estabelecidas e os resultados observados (Figura 6). Tal cenário refletia as dificuldades identificadas na integração de dados, variabilidade operacional e falta de previsibilidade quanto às causas das paradas.

Com o progresso do estudo, foi possível estabilizar o sistema, ajustar os modelos preditivos e otimizar os processos, conforme evidenciado pela evolução dos indicadores no Gêmeo Digital (Figura 7). Essa transformação demonstrou que a combinação entre sensores IoT, análise em tempo real e simulação virtual permite uma visão mais clara e estruturada do desempenho produtivo.

5.2 IMPACTOS OBSERVADOS

5.2.1 Redução das Paradas Não Programadas

A implementação dos sensores e do sistema de Gêmeos Digitais possibilitou identificar padrões e prever falhas em equipamentos, permitindo ações corretivas mais rápidas e assertivas. Essa melhoria é diretamente atribuída à automação do cálculo do OEE e ao uso de dados históricos para alimentar modelos de Machine Learning (MOURTZIS; VLACHOU; MILAS, 2016).

5.2.2 Ajuste Contínuo de Parâmetros Produtivos

Os algoritmos desenvolvidos possibilitaram o ajuste dinâmico dos parâmetros de produção, como velocidade e temperatura, maximizando a performance sem comprometer a qualidade (ARORA; PANDEY; KUMAR, 2019). A redução do “*downtime*” teve impacto direto no aumento da disponibilidade e performance das linhas monitoradas.

5.2.3 Melhoria da Qualidade dos Produtos

A integração das inspeções AOI e ICT possibilitou detectar e corrigir não conformidades em estágios iniciais do processo produtivo, evitando retrabalhos e desperdícios. A análise preditiva baseada nos Gêmeos Digitais permitiu simular cenários e antecipar possíveis problemas (FENZA et al., 2020).

5.3 SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Outro resultado importante foi a contribuição para a sustentabilidade industrial, um dos objetivos destacados inicialmente. A maximização da eficiência operacional e a utilização de recursos como energia e insumos em níveis otimizados reduziram desperdícios e o impacto ambiental, alinhando-se ao conceito de indústria sustentável (GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA 4.0, 2023). Essa prática está em consonância com tendências globais, como observado em iniciativas da Coca-Cola e da BMW Group (COCA-COLA HELLENIC BOTTLING COMPANY, 2023; BMW GROUP, 2022).

5.4 DESAFIOS SUPERADOS

Os principais desafios identificados incluíram:

- Integração com Equipamentos Legados: Foi necessário adaptar os sensores e a infraestrutura de TI para compatibilidade com máquinas de gerações anteriores, uma limitação comum em ambientes industriais tradicionais (STACKPOLE, 2023).
- Qualidade e Consistência dos Dados: O aprimoramento da coleta e filtragem de dados foi fundamental para garantir medições precisas, minimizando ruídos e variações não desejadas nos indicadores (LI; PANGBORN; KOVALENKO, 2023).
- Capacitação Técnica da Equipe: O desenvolvimento de habilidades específicas para a operação do sistema foi uma etapa crítica para garantir a adesão dos colaboradores à nova metodologia.

6 CONCLUSÃO DA DISCUSSÃO

Os resultados apresentados demonstram que a implementação de Gêmeos Digitais e a automação do cálculo do OEE representam um avanço significativo na busca pela excelência operacional e eficiência produtiva na Indústria Eletroeletrônica do PIM. Ao conectar dados em tempo real com análises preditivas e simulações, foi possível não apenas identificar e solucionar problemas de forma proativa, mas também estabelecer uma base sólida para a melhoria contínua dos processos industriais.

Dessa forma, o estudo comprova que as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, quando aplicadas de forma pragmática e acessível, oferecem benefícios substanciais, como redução de custos, otimização de recursos e maior sustentabilidade, alinhando-se aos objetivos estratégicos e competitivos da Zona Franca de Manaus.

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

- AGUIAR, L. F. O. Indústria 4.0: Perspectivas para o Polo Industrial de Manaus. Editora Itacaiúnas, 2022. Disponível em: <https://editoraitacaiunas.com.br/produto/industria-4-0/>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- ALMEIDA, O. C.; BRILHANTE, J. C.; PINTO, F. R.; ALENCAR, D. B. Energy efficiency and sustainability in a productive industry in Manaus. *International Journal for Innovation Education and Research*, v. 7, n. 11, 2019. Disponível em: <https://scholarsjournal.net/index.php/ijer/article/view/1969>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- ATLASGOV. OEE: Calculando o nível de eficiência de um equipamento na indústria. AtlasGov, 2023. Disponível em: <https://welcome.atlasgov.com/blog/gestao/oeo>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- BALLUFF BRASIL. Automação industrial: os principais desafios para a revolução da indústria brasileira. Blog Balluff, 2023. Disponível em: <https://www.balluff.com/pt-br/blog/automacao-industrial-os-principais-desafios-para-a-revolucao-da-industria-brasileira>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- BOLENDER, T.; BÜRVENICH, G.; DALIBOR, M.; RUMPE, B.; WORTMANN, A. Self-Adaptive Manufacturing with Digital Twins. arXiv preprint arXiv:2103.11941, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2103.11941>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- BMW GROUP. BMW iFactory: A masterclass in digitalization, flexibility, and sustainability. BMW Group, 2022. Disponível em: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2022/bmw-ifactory-digital.html>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- COCA-COLA HELLENIC BOTTLING COMPANY. Supply Chain. Disponível em: <https://www.cocalahellenic.com/en/about-us/what-we-do/supply-chain>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- FENZA, Giuseppe et al. Semantic CPPS in Industry 4.0. arXiv preprint arXiv:2011.11395, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2011.11395>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- FOXCONN INDUSTRIAL INTERNET. About us. Disponível em: <https://foxconniai.com/about>. Acesso em: 14 dez. 2024.
- GÊMEOS DIGITAIS e da Indústria 4.0: Ambientes de Sinergia. Blog Itaipu Parque Tecnológico, 2023. Disponível em: <https://blog.itaipuparquetec.org.br/gemeos-digitais>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- GÊMEOS DIGITAIS na Indústria 4.0. Schneider Electric, 2023. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/about-us/newsroom/news/press-releases/g%C3%A0Ameos-digitais-na-ind%C3%BAstria-4-0-65a18399958daea6e205f498>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- HANSEN, Robert C. Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production/Maintenance Tool for Increased Profits. 1. ed. Nova York: Industrial Press, 2002.
- LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LIMA, A. K. C. A eficiência energética em uma indústria de eletroeletrônicos do Polo Industrial de Manaus: desafios de implantação e novas possibilidades. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, 2015. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4926>. Acesso em: 14 dez. 2024.

LI, H.; PANGBORN, H. C.; KOVALENKO, I. A System-Level Energy-Efficient Digital Twin Framework for Runtime Control of Batch Manufacturing Processes. arXiv preprint arXiv:2309.10151, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2309.10151>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MACHINE LEARNING in Manufacturing – A Look at OEE Forecasting. ClearPeaks, 2023. Disponível em: <https://www.clearpeaks.com/machine-learning-in-manufacturing-a-look-at-oeeforecasting>. Acesso em: 15 dez. 2024.

MCKINSEY & COMPANY. Digital twins: The next frontier of factory optimization. McKinsey Digital, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MOURTZIS, Dimitris; VLACHOU, Evangelos; MILAS, Nikolaos. Industrial Big Data as a result of IoT adoption in manufacturing. Procedia CIRP, v. 55, p. 290-295, 2016.

NVIDIA CORPORATION. How Digital Twins Are Driving Efficiency and Cutting Emissions in Manufacturing. NVIDIA Blog, 2023. Disponível em: <https://blogs.nvidia.com/blog/digital-twins-sustainable-manufacturing/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

PEREIRA, Antonio C.; ROMERO, Fernando. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. Procedia Manufacturing, v. 13, p. 1206-1214, 2017.

PORTER, Michael E.; HEPPELMANN, James E. How smart, connected products are transforming competition. Harvard Business Review, v. 92, n. 11, p. 64-88, 2014.

PROCESS GENIUS. Digital Twin in Industry: 8 Reasons Why Digital Twins Are Important. Process Genius, 2023. Disponível em: <https://processgenius.eu/digital-twin-in-industry-8-reasons-why-digital-twins-are-important/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

RAMOS, C. A.; RIBEIRO, P. F.; BARBOZA, W. S.; DIAS, M. J.; ALCÂNTARA, G. A. M. O avanço da automação industrial no Brasil: cenário atual e perspectivas futuras. Revista de Engenharia, v. 28, n. 134, 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/o-avanco-da-automacao-industrial-no-brasil-cenario-atual-e-perspectivas-futuras/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

SOUZA, R. P. Potencial para eficiência energética em segmentos do Polo Industrial de Manaus/AM. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, 2015. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4811/>. Acesso em: 14 dez. 2024.

STACKPOLE, B. For AI in manufacturing, start with data. MIT Sloan, 2023. Disponível em: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/ai-manufacturing-start-data>. Acesso em: 14 dez. 2024.

STOLZ, Stefan; LORENZ, Johannes; FISCHER, Thomas. Root Cause Analysis of Productivity Losses in Manufacturing Systems Utilizing Ensemble Machine Learning. arXiv preprint arXiv:2407.21503, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2407.21503>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS (SUFRAMA). Comitê das Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia (CAPDA). Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/zfm/pdi/capda>. Acesso em: 14 dez. 2024.