

INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA MITIGAR AS INVERSÕES DE KANBAN NA MANUFATURA AUTOMOTIVA

INTEGRATION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES TO MITIGATE KANBAN INVERSIONS IN AUTOMOTIVE MANUFACTURING

José Antonio Sabadini¹
Fernando Augusto Silva Marins²
Aneirson Francisco da Silva³

Resumo: *A pesquisa investiga a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 para mitigar a inversão de Kanbans na manufatura automotiva, com foco na fábrica da Toyota do Brasil. O sistema Kanban, fundamental para a produção enxuta, sofre inversões devido às falhas na gestão manual dos cartões, afetando a eficiência produtiva e a logística. Nessa dissertação adotou-se tecnologias como a Internet das Coisas (IoT – Internet of Things) e Identificação por Radiofrequência (RFID – Radio Frequency Identification) para monitoramento em tempo real, prevenindo erros e melhorando a rastreabilidade do fluxo produtivo. A abordagem metodológica combinou análise bibliométrica, levantamento de dados históricos e a técnica Delphi para obtenção de consenso entre especialistas. A implementação das soluções sugeridas contribuiu para a redução de desperdícios, melhoria operacional e alinhamento do sistema Kanban com os princípios da Indústria 4.0, garantindo maior confiabilidade nos processos produtivos.*

Palavras-chave: *Manufatura Automotiva; Inversão de Kanban; Indústria 4.0; Internet das Coisas; Identificação por Rádio Frequência.*

Abstract: *The research investigates the application of Industry 4.0 technologies to mitigate Kanban inversion in automotive manufacturing, focusing on the Toyota factory in Brazil. The Kanban system, which is fundamental to lean production, experiences inversions due to failures in the manual management of cards, affecting both production efficiency and logistics. The dissertation adopted technologies such as the Internet of Things (IoT) and Radio Frequency Identification (RFID) for real-time monitoring, aiming to prevent errors and enhance the traceability of the production flow. The methodological approach combined*

¹ Bacharel em Administração COMEX (FAM); MBA em Engenharia e Gestão da Manufatura e Manutenção (UNISAL). Mestrando na – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá (UNESP) Contato: jsabaddini@gmail.com.

² Professor Doutor UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá Contato: fernando.marins@unesp.br.

³ Professor Doutor UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá Contato: aneirson.silva@unesp.br.

bibliometric analysis, historical data collection, and the Delphi technique to reach a consensus among experts. The implementation of the proposed solutions contributed to waste reduction, operational improvement, and alignment of the Kanban system with Industry 4.0 principles, ensuring greater reliability in production processes.

Keywords: *Automotive Manufacturing; Inversion of Kanban cards; Industry 4.0; Internet of Things; Radio Frequency Identification.*

I. INTRODUÇÃO

A crescente adoção da Indústria 4.0 (*Industry 4.0 – I4.0*) na manufatura automotiva tem impulsionado a necessidade de modernização dos processos produtivos (MONYE *et al.*, 2023). Neste contexto, o sistema Kanban, amplamente utilizado para gestão visual da produção e controle de fluxo de materiais, enfrenta desafios operacionais significativos (KAMAL, 2020).

Um dos principais problemas observados é a inversão de *Kanbans*, que ocorre quando cartões de controle são removidos ou reposicionados incorretamente, comprometendo a rastreabilidade das peças, a eficiência do processo e a satisfação do cliente (AGARWAL e AGARWAL, 2020).

A inversão de *Kanbans* gera impactos diretos na logística de peças de reposição, ocasionando desperdício de materiais, aumento nos custos operacionais e necessidade de retrabalho, o que pode afetar a competitividade da empresa (KAMAL, 2020).

A literatura existente destaca o potencial da integração de tecnologias da Indústria 4.0, como Identificação por Radiofrequência (*Radio Frequency Identification - RFID*) e Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*), para otimizar processos produtivos e minimizar falhas operacionais (ZHANG *et al.*, 2008).

No entanto, há uma oportunidade para pesquisas voltadas especificamente para a prevenção da inversão de *Kanbans* em ambientes adversos, como os processos de pintura por imersão, que envolvem alta temperatura, umidade elevada e tensão elétrica significativa.

Dessa forma, nesta pesquisa buscou-se investigar as causas da inversão de *Kanbans* no setor de produção de peças de reposição da indústria automotiva e propor soluções baseadas nas tecnologias da I4.0 para mitigar esse problema.

Como contribuição deste trabalho, foi aprimorada a aplicação dos princípios da Manufatura Enxuta (*Lean Manufacturing - LM*), e o desenvolvimento de diretrizes para o uso de sistemas inteligentes de monitoramento que promovessem maior rastreabilidade, redução de falhas e alinhamento com os conceitos de manufatura digital.

A inversão de *Kanbans* ocorre quando a ordem lógica de produção é alterada ou quando os cartões são mal gerenciados, levando a problemas de fluxo. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando o operador retira o *Kanban* da peça e ao retornar o coloca fora da posição original em outro tipo de peça semelhante (BADHOTIYA *et al.*, 2024a) causando atrasos, desperdício de recursos, redução da eficiência operacional, custos com logística reversa e insatisfação do cliente.

Ao investigar as causas da inversão dos *kanbans* e propor soluções baseadas em novas tecnologias, a pesquisa aqui descrita não apenas aprimorou a aplicação dos princípios LM, mas também explorou como a tecnologia moderna pode fortalecer esses sistemas tradicionais.

Deste modo, essa pesquisa esteve focada na indústria automotiva e contribuiu para destacar a importância da integração das tecnologias e conceitos da Indústria 4.0.

Enunciam-se, após esta contextualização, as questões de pesquisa que motivaram este trabalho como sendo:

- Quais são as causas principais da inversão de *Kanbans* na produção e quais novas tecnologias podem ser implementadas?
- Como monitorar de forma eficaz o processo de fabricação para prevenir a inversão de *Kanbans* e melhorar a eficiência operacional?

Visando responder às questões de pesquisa, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver soluções baseadas nas tecnologias da I4.0 com o intuito de prevenir a inversão de *kanbans* na manufatura automotiva.

Os objetivos específicos referentes à empresa estudada foram:

- Mapear em qual processo está ocorrendo a inversão de *kanbans*.
- Identificar quais são as causas da inversão dos *kanbans* na produção das peças de reposição.
- Apresentar uma proposta de sistema de monitoramento em tempo real utilizando IoT para solucionar a inversão dos *kanbans* nas peças.

Por fim, pode-se acrescentar que, neste trabalho, buscou-se aumentar a eficiência e mitigar a inversão de *kanbans* no processo de produção de peças de reposição, e, consequentemente, diminuir a devolução das peças pelas concessionárias gerando custos extras, descarte do material e, o mais importante, diminuir o impacto no meio ambiente gerado por esta atividade.

Este trabalho assume relevância significativa para profissionais de logística, engenharia de produção e gestão da cadeia de suprimentos, bem como para pesquisadores, estudantes e demais interessados no tema.

Dada a escassez de materiais acadêmicos específicos sobre inversão de *Kanbans* e sua relação com a Indústria 4.0, justifica-se a realização desta pesquisa, que visa preencher essa lacuna e contribuir com soluções práticas e teóricas. O conteúdo foi estruturado de forma clara e objetiva, buscando facilitar a compreensão e aplicação dos conceitos abordados.

A relevância desta pesquisa se justifica, também, pela necessidade crescente de aprimorar a eficiência operacional e reduzir desperdícios no setor automotivo, além de oferecer uma abordagem inovadora para a gestão de *Kanbans* em ambientes desafiadores (HĄBEK *et al.*, 2023).

A inversão de *Kanbans* na manufatura automotiva gera impactos significativos na eficiência operacional, custos logísticos e na satisfação do cliente (BADHOTIYA *et al.*, 2024c). O problema ocorre quando os cartões *Kanban* são deslocados ou trocados, resultando em inconsistências na produção e na entrega de peças de reposição. Esse fenômeno não apenas compromete o fluxo produtivo enxuto, mas também gera desperdícios, retrabalho e impactos ambientais devido ao descarte de materiais (LÍVIA *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, a integração de tecnologias da I4.0 surge como uma solução para mitigar esse problema. A utilização de IoT, RFID e sistemas de monitoramento em tempo real pode garantir um controle mais preciso do fluxo de materiais, reduzindo falhas operacionais e melhorando a rastreabilidade do processo produtivo (TAN e SIDHU, 2022).

A aplicação dessas tecnologias se alinha às diretrizes da transformação digital na indústria, promovendo maior eficiência e confiabilidade no gerenciamento do sistema *Kanban* (DURAIVELU, 2022). Este projeto é fundamentado não apenas na necessidade de otimizar processos produtivos, mas também no impacto positivo que proporciona na redução de custos e na aplicação eficiente dos princípios do LM.

O sistema *Kanban*, amplamente adotado em ambientes produtivos por sua simplicidade e eficiência, também apresenta vulnerabilidades importantes, especialmente quando operado em formato manual. A inversão de *Kanbans*, por exemplo, é um dos problemas mais críticos observados na prática, pois gera inconsistências entre o pedido do cliente e a peça entregue, afetando diretamente a satisfação do consumidor (ASENCIOS SORIA *et al.*, 2024).

A literatura especializada já aponta os limites operacionais dos sistemas *Kanban* convencionais. Problemas como a perda de cartões, falhas na comunicação entre as etapas do processo e a baixa visibilidade do inventário são recorrentes em ambientes que ainda dependem de registros físicos e controle visual.

Nesse contexto, a introdução da tecnologia RFID tem se destacado como uma solução promissora. Estudos como os de Zhang *et al.* (2008), Su *et al.* (2009) e Tabanlı *et al.* (2013) mostraram que a adoção do RFID no *Kanban* automatiza a coleta de dados, aumenta a rastreabilidade, reduz erros operacionais e melhora significativamente a eficiência logística.

No entanto, embora a literatura documente esses benefícios em contextos produtivos estáveis, ainda há uma lacuna significativa quando se trata de ambientes industriais que operam sob condições adversas, como alta temperatura, umidade elevada, tensão elétrica de 420 V e calor extremo como ocorre no setor de pintura por imersão.

Nessas situações, tanto os cartões físicos quanto os dispositivos eletrônicos ficam sujeitos a falhas por desgaste térmico, interferências eletromagnéticas e degradação de materiais, comprometendo a confiabilidade do sistema.

Poucos estudos (ver análise bibliométrica adiante) exploram a viabilidade da aplicação do RFID em tais condições, tampouco oferecem diretrizes práticas sobre como adaptar essas soluções tecnológicas a realidades produtivas mais severas.

Esse vazio teórico e metodológico evidenciou uma oportunidade de contribuição: investigar como a tecnologia RFID pode ser utilizada de maneira eficaz para mitigar a inversão de *Kanbans* em ambientes agressivos, oferecendo soluções aplicáveis a setores que enfrentam realidades semelhantes.

II. METODOLOGIA

A produção de peças de reposição desempenha um papel fundamental na manutenção da eficiência e confiabilidade das redes de concessionárias, garantindo a disponibilidade dos componentes necessários para atender prontamente às demandas dos clientes (ZHANG *et al.*, 2021). Um fornecimento ágil e preciso dessas peças é essencial para assegurar a satisfação dos consumidores, minimizar tempos de espera e fortalecer a reputação da marca no mercado automotivo (ACHETOUI *et al.*, 2019).

A aquisição de dados quantitativos foi feita por meio da análise de dados históricos de Relatório de Não-Conformidade Logístico (*Logistics Non-Conformity Report - RNCL*) do período de 2020 até 2024 emitido pelo departamento de Logística de Peças de Reposição (*Service Parts Logistics - SPL*).

A aquisição de dados qualitativos foi por intermédio do método Delphi (LINSTONE *et al.*, (2002), que é um método estruturado de pesquisa qualitativa utilizado para obter consensos entre um grupo de especialistas sobre um tema específico. O Delphi

tem sido amplamente utilizado em pesquisas que envolvem previsão, planejamento estratégico, desenvolvimento de diretrizes ou tomadas de decisão.

Conforme afirmado por Bueno *et al.* (2024), a técnica Delphi consiste em um processo iterativo de consulta, no qual um grupo de colaboradores, selecionados por sua experiência e envolvimento com o processo de *Kanban*, será convidado a participar de rodadas sucessivas de questionários.

Essas rodadas de consultas permitirão a revisão das respostas com base no *feedback* consolidado do grupo. O método garante o anonimato dos participantes, reduzindo possíveis influências de hierarquia ou de opinião dominante e incentivando uma contribuição mais genuína e imparcial.

As fases da técnica Delphi, conforme explicado por Bueno *et al.* (2024), incluem:

1. Rodada inicial: os colaboradores serão questionados sobre suas percepções e sugestões para resolver a inversão de *Kanban* no processo.
2. *Feedback*: as respostas serão coletadas e sintetizadas, oferecendo aos participantes uma visão do consenso do grupo.
3. Revisão: os participantes terão a oportunidade de revisar suas respostas com base nas opiniões coletivas apresentadas, podendo ajustar suas respostas após refletirem sobre os pontos de vista e argumentos compartilhados pelos demais membros do grupo.
4. Avaliação final: após a conclusão de todas as rodadas, será feita uma análise das respostas finais para identificar as melhores práticas e possíveis soluções para o problema.

A proposta construída neste trabalho surgiu da necessidade real de resolver um problema que vem impactando diretamente a rotina da fábrica, a inversão dos *Kanbans* durante etapas críticas da produção.

III. RESULTADOS

3.1 – Resultados da Simulação

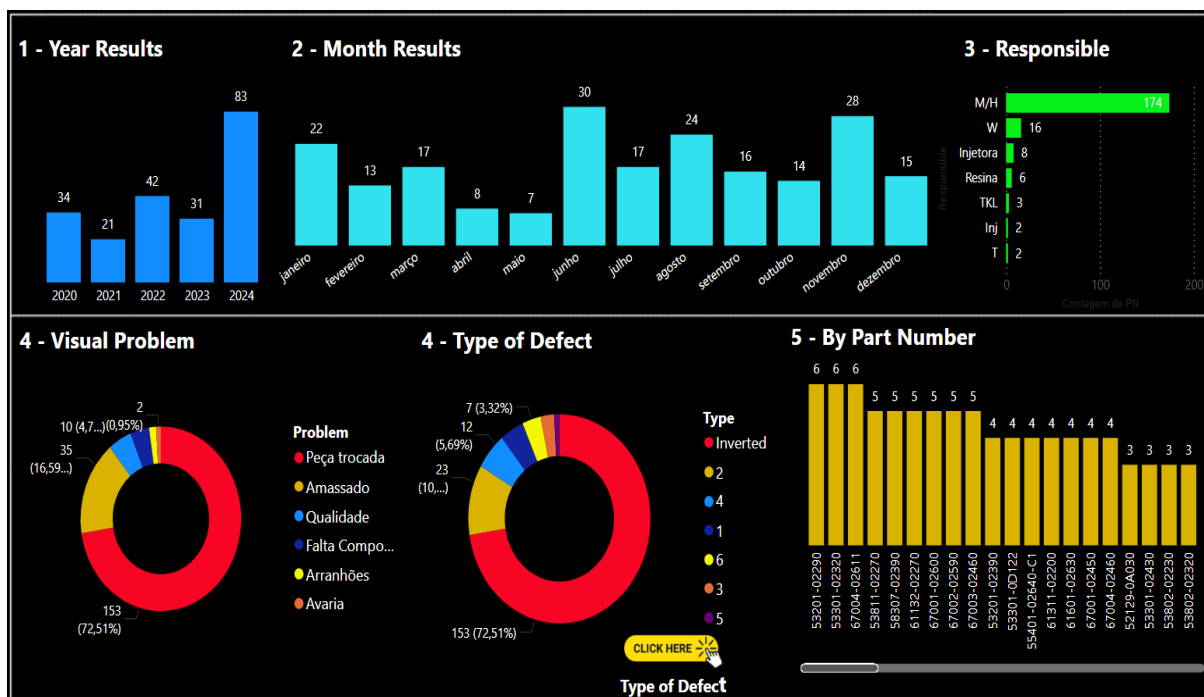
Na Figura 1 pode-se observar a aquisição de dados quantitativos, feita por meio da análise de dados históricos de RNCL do período de 2020 até 2024 emitido pelo Departamento de SPL, e foi possível identificar os tipos de defeitos com maior índice de devolução de peças, bem como a etapa do processo em que essas falhas ocorreram com maior frequência.

Na Figura 1, em problemas visuais (*Visual Problems*), mostra-se os tipos de problemas visíveis identificados nas peças. Os dados indicam a frequência com que cada tipo ocorreu:

- **Peça trocada:** 153 ocorrências
- **Amassado:** 35 ocorrências
- **Qualidade:** 10 ocorrências
- **Falta componente:** 5 ocorrências
- **Arranhões:** 3 ocorrências
- **Avaria:** 5 ocorrências

A grande maioria dos problemas visuais se refere a peça trocada, representando mais de 70% do total. Isso foi confirmado pelo que está ilustrado na Figura 1, na informação sobre o tipo de defeito (*type of defects*) que aponta que mais de 70% das peças estavam invertidas, isso sugere que há uma falha recorrente no controle, separação identificação correta das peças.

Figura 1 – Controle de RNCL



Fonte: Elaboração própria

Ainda na Figura 1, na informação sobre o Responsável (*Responsible*), apresenta a quantidade de defeitos atribuída às diferentes áreas do processo produtivo. A análise é baseada na contagem de número das peças (*Part Number* - PN), ou seja, a quantidade de códigos de peça associados a cada responsável. Observe-se que a área MH é a principal responsável, com 174 ocorrências, o que representa a grande maioria dos defeitos registrados. Isso sugere que a movimentação interna é um ponto crítico e precisa de atenção imediata para redução de falhas.

Diante das condições extremas encontradas nesse ambiente, temperaturas que chegam a 250 °C, umidade total e alta voltagem, ficou claro que os cartões físicos de papel e plástico usados no processo não garantiam o nível de controle e rastreabilidade esperado. Era preciso pensar em algo mais robusto e alinhado aos tempos atuais.

Para avaliar a viabilidade da proposta desenvolvida e validar as decisões técnicas tomadas ao longo do processo, optou-se pela aplicação do método Delphi (ver na Figura 2 o questionário aplicado).

Essa abordagem foi escolhida por permitir a coleta estruturada de opiniões de especialistas da área, em um formato que favorece o amadurecimento das respostas ao longo de diferentes rodadas, sempre preservando o anonimato e evitando a influência direta entre os participantes.

O ponto de partida foi a seleção criteriosa dos especialistas que fariam parte do painel. A escolha considerou profissionais com experiência prática em chão de fábrica, engenharia de processos, logística industrial e tecnologia da informação aplicada à manufatura. Todos atuam nos setores diretamente relacionados ao ambiente industrial analisado. Essa diversidade foi importante para garantir visões complementares, tanto técnicas quanto operacionais.

Figura 2 – Questionário 1

Instruções ao participante:

Você foi selecionado como especialista devido à sua experiência em algumas das áreas descritas (manufatura, logística, engenharia de produção ou tecnologia industrial). Solicitamos que responda com base em sua vivência prática, considerando viabilidade, riscos e oportunidades da proposta apresentada.

Questões:

1. Qual sua percepção sobre o impacto da inversão de *Kanbans* na eficiência logística e produtiva?
2. Em sua opinião, quais são os maiores desafios operacionais enfrentados na preparação dos Skids e gerenciamento dos *Kanbans*?
3. Você acredita que a substituição do *Kanban* físico por etiquetas RFID resistentes é tecnicamente viável? Justifique sua resposta.
4. Considerando sua experiência, quais critérios devem ser priorizados para garantir que o RFID funcione de forma confiável em ambientes agressivos com pintura por imersão (alta temperatura, umidade e tensão elétrica)?
5. A utilização de um middleware para organizar e transmitir os dados RFID ao MES e ERP parece aplicável na prática da sua empresa ou setor? Quais riscos você observa?
6. Que sugestões você daria para o aperfeiçoamento da proposta apresentada?
7. Deseja incluir alguma observação adicional relevante para o sucesso da solução?

Fonte: Elaboração própria

A primeira rodada consistiu em apresentar aos participantes o cenário atual, com os desafios enfrentados em função da inversão de *Kanbans*, e a proposta elaborada com base na integração do RFID a um sistema de gestão. A partir disso, foram formuladas perguntas abertas e afirmativas avaliativas, permitindo que os especialistas opinassem sobre pontos como viabilidade técnica, aplicabilidade em condições extremas, impacto sobre os processos logísticos e possíveis obstáculos à implementação.

Com base nas contribuições iniciais, foi elaborado um segundo questionário (ver Figura 3), mais direcionado, que buscava refinar os pontos de consenso e destacar possíveis ajustes na proposta original.

Essa segunda rodada teve como foco principal medir o grau de concordância dos especialistas em relação aos elementos centrais da solução proposta, como a adoção de *middleware*, o uso de etiquetas de alta resistência, e a integração com os sistemas de gestão existentes.

3.2 – Resultados dos Ensaios em Campo

O processo de consulta aos especialistas, conduzido de forma *online*, garantiu praticidade e agilidade no retorno das respostas. Ao final das rodadas, foi possível identificar um alto nível de convergência em torno das diretrizes propostas, especialmente quanto à importância de automatizar a coleta e o tratamento das informações para evitar falhas operacionais.

Figura 3 – Questionário 2

Instruções ao participante:

Abaixo estão afirmações baseadas nas contribuições da primeira rodada. Por favor, indique seu grau de concordância com cada uma delas, utilizando a escala de 1 a 5, onde:

1 = Discordo totalmente, 2 = Discordo, 3 = Neutro, 4 = Concordo, 5 = Concordo totalmente

Afirmações:

1. A inversão de Kanbans impacta significativamente a eficiência operacional e deve ser tratada como prioridade.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
2. A aplicação de etiquetas RFID resistentes é uma alternativa viável para substituir os cartões físicos em ambientes com pintura por imersão.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
3. A leitura automática por RFID pode mitigar falhas logísticas e retrabalho gerados pela manipulação manual dos cartões.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
4. O uso de middleware é essencial para garantir o tratamento adequado dos dados coletados via RFID.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
5. A integração entre middleware e sistemas MES/ERP pode garantir rastreabilidade e controle em tempo real do processo produtivo.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
6. A proposta apresentada está alinhada aos princípios da Indústria 4.0.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
7. A adoção dessa solução exigirá treinamento e sensibilização das equipes operacionais.

1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente
8. A proposta apresentada é tecnicamente viável e poderia ser implementada com adaptações mínimas na realidade de sua empresa ou setor.

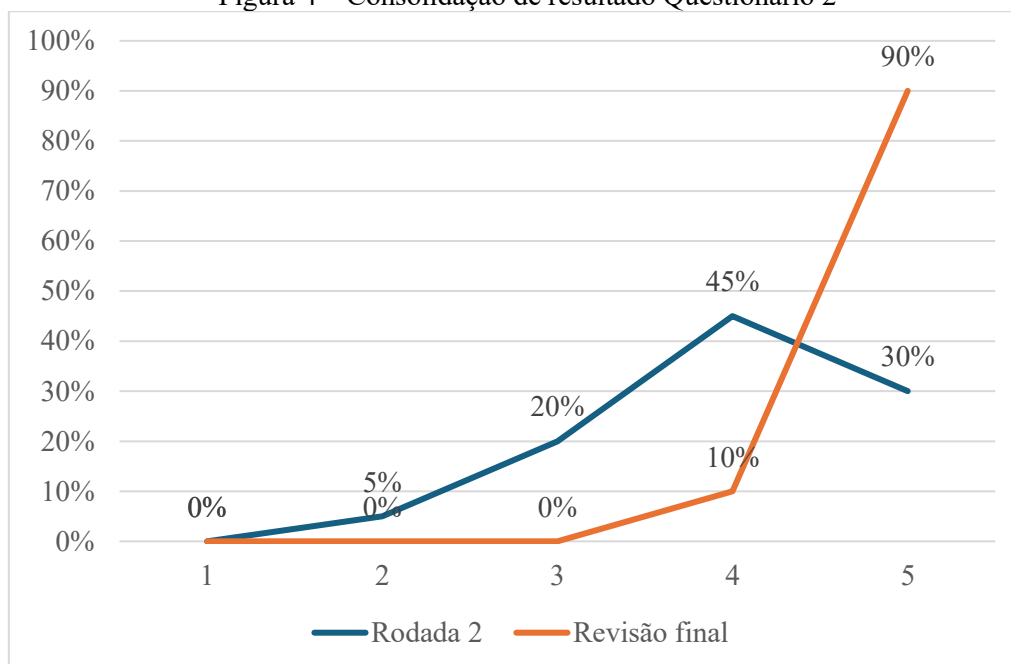
1: Discordo totalmente
2: Discordo
3: Neutro
4: Concordo
5: Concordo totalmente

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 4, pode-se observar a consolidação das respostas do Questionário 2, obtida por meio da aplicação da técnica Delphi junto aos especialistas selecionados. Os

dados revelam a distribuição das respostas na escala Likert (1 = Discordo totalmente até 5 = Concordo totalmente), comparando os resultados da Rodada 2 com a Revisão final.

Figura 4 – Consolidação de resultado Questionário 2



Fonte: Elaboração própria

Na Rodada 2 (linha azul), identifica-se que parte dos respondentes ainda demonstrava dispersão em suas percepções, com 5% em nível de discordância (2), 20% em posição neutra (3), e maior concentração nos níveis de concordância (45% em “4” e 30% em “5”).

Já na Revisão final (linha laranja), observa-se um movimento de convergência para os níveis mais elevados de concordância, com 90% dos especialistas avaliando a afirmação como “Concordo totalmente” e 10% como “Concordo”. As demais categorias não receberam respostas, evidenciando a consolidação do consenso.

Esse resultado demonstra que, após as etapas de feedback e reavaliação, os especialistas ajustaram suas percepções, validando a proposta apresentada e confirmando sua relevância para a mitigação da inversão de *Kanbans* por meio da integração do RFID ao processo produtivo.

A aplicação do método Delphi contribuiu não apenas para confirmar os caminhos adotados, mas também para ampliar a visão sobre aspectos práticos da implementação, enriquecendo a proposta com sugestões vindas diretamente de quem vive os desafios da indústria no dia a dia.

Foi a partir dessa constatação que a ideia de integrar a tecnologia RFID ao processo produtivo ganhou força. As etiquetas (*tags*) RFID escolhidas foram selecionadas não apenas pela capacidade de suportar calor, umidade e alta voltagem, mas também pela possibilidade de fornecer informações precisas sobre cada peça ao longo de todos os processos, na Figura 5 pode-se observar a *tag* de RFID escolhida.

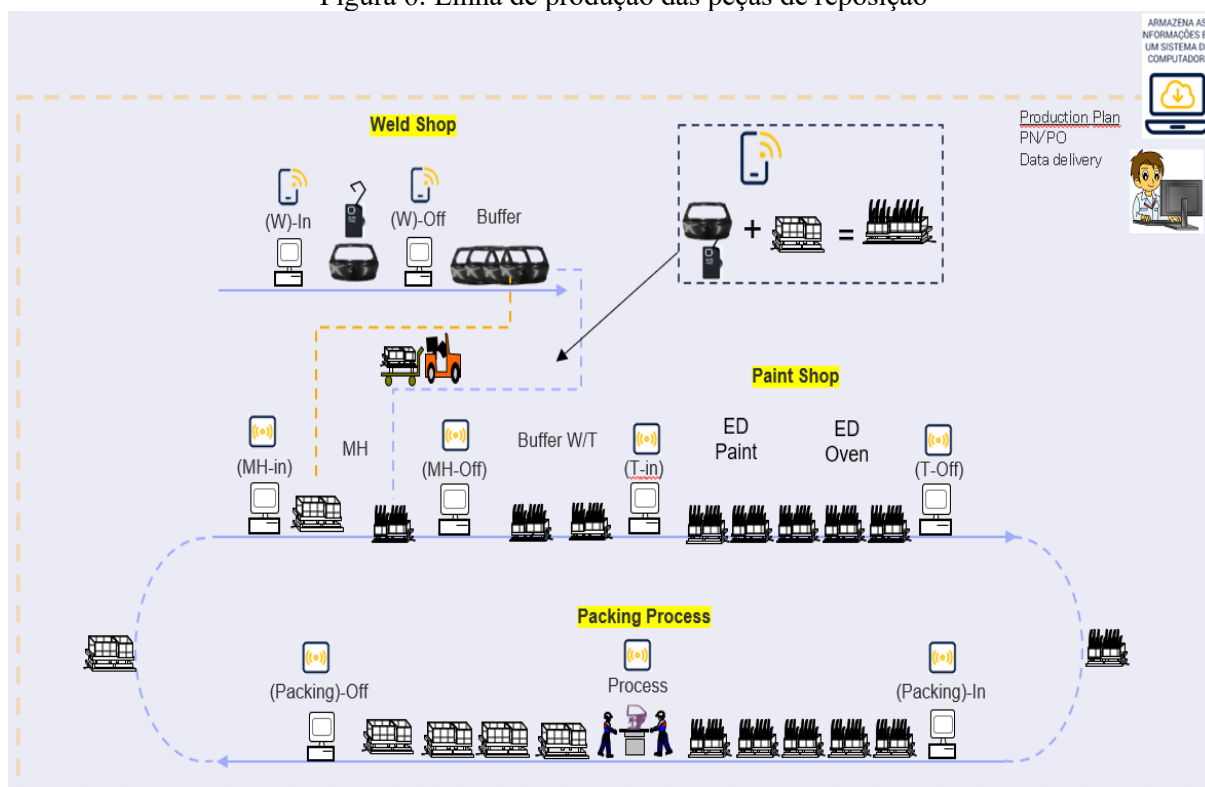
Figura 5 – Tag RFID Rígida



Fonte: Elaboração própria

A leitura automática dessas etiquetas por antenas e sensores espalhadas pela linha de produção permitirá acompanhar em tempo real seu trajeto ponto a ponto, eliminando as falhas que hoje surgem justamente pelo manuseio manual. Na Figura 6 está a ilustração da linha de produção e os pontos de leitura por meio de antenas e sensores.

Figura 6: Linha de produção das peças de reposição



Fonte: Elaboração própria

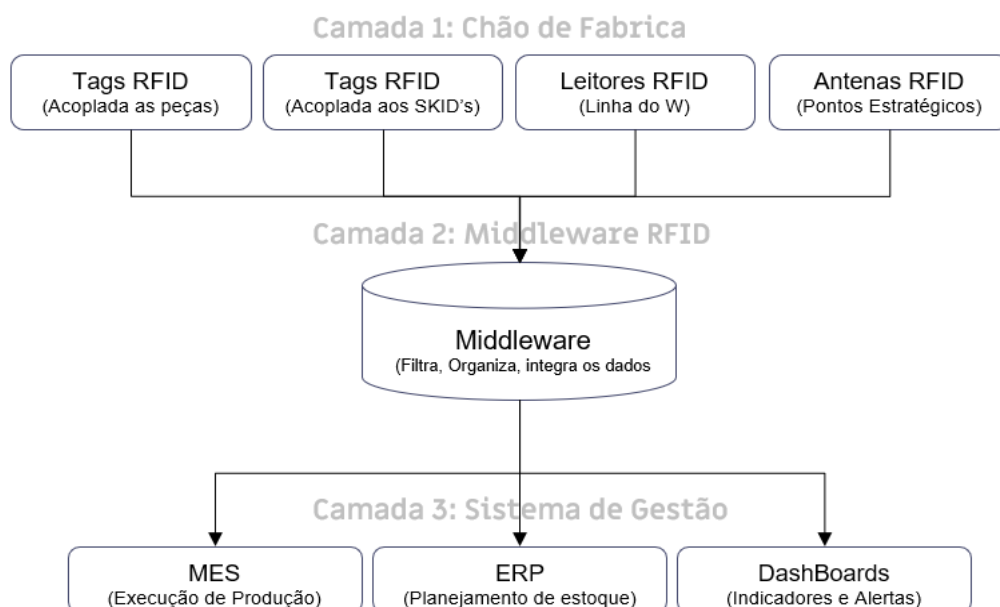
Mas, observe-se que não basta apenas capturar dados, foi pensado também em como tratar essas informações. Por isso, a proposta inclui um sistema intermediário conhecido como *middleware*, que será responsável por organizar e traduzir os dados coletados, conectando-os de forma inteligente aos sistemas já utilizados pela empresa, como o MES e o ERP.

Dessa maneira, os operadores e gestores não só terão acesso a relatórios mais confiáveis, mas também poderão agir rapidamente quando algo sair do esperado. Na Figura 20 está a ilustração do fluxo sistêmico da implementação do RFID com *middleware*.

Assim, a Figura 7 apresenta a visão sistêmica da arquitetura proposta para a implementação da tecnologia RFID integrada a um *middleware* em um ambiente industrial.

Na parte superior da Figura 7, localizam-se os elementos físicos do chão de fábrica, compostos por etiquetas RFID acopladas diretamente às peças e aos dispositivos de transporte, SKID (*Support structure for Parts* -SKID), leitores RFID posicionados estrategicamente ao longo da linha de produção, linha da Funilaria e MH, já na Pintura, antenas complementares que ampliam a capacidade de leitura em ambientes com obstáculos ou interferências. Esses componentes têm como função capturar automaticamente os dados de identificação e movimentação das peças, substituindo os cartões *Kanban* físicos utilizados no sistema tradicional.

Figura 7 - Fluxo sistêmico da implementação do RFID com *middleware*



Fonte: Elaboração própria

Esses dados são transmitidos para a camada intermediária, representada pelo *middleware* RFID, que exerce o papel de filtragem, organização e integração das informações coletadas.

O *middleware* elimina duplicidades, interpreta eventos, converte os dados em formatos compatíveis e os distribui para os sistemas corporativos de forma estruturada. Essa etapa é essencial para garantir a confiabilidade, a rastreabilidade e o controle em tempo real das operações produtivas, sobretudo em ambientes com condições adversas como alta temperatura, umidade e tensão elétrica elevada.

Na parte inferior da Figura 7 estão os sistemas de gestão integrados, que recebem os dados processados. Entre estes sistemas, destacam-se o MES, que é responsável pelo monitoramento e controle da produção em tempo real, o ERP, que gerencia recursos como estoque, ordens e materiais, e os *dashboards* operacionais, que consolidam indicadores de desempenho e alertas relevantes para a tomada de decisão.

Assim, buscou-se com essa proposta, além de evitar erros, transformar o processo produtivo, tornando-o mais ágil, eficiente e preparado para responder aos desafios do dia a dia, em um ambiente onde cada detalhe conta, e ter informações certas no momento certo faz toda a diferença.

IV. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste artigo foi atingido, uma vez que a proposta de mitigar a inversão de *Kanbans* em ambientes produtivos com condições operacionais severas foi concebida, fundamentada na literatura e validada por especialistas da área por meio do método Delphi. A partir do mapeamento detalhado do problema no setor de movimentação de materiais, foi possível identificar que a retirada temporária dos *Kanbans* físico antes da pintura por imersão é o principal fator responsável pela inversão de cartões no fluxo produtivo.

A fundamentação teórica abordou conceitos essenciais para a compreensão do problema e para a construção da solução proposta, com destaque para a tecnologia RFID, middleware de integração e sistemas de gestão MES e ERP, alinhados às diretrizes da I4.0.

Com isso, foi possível responder às duas questões centrais da pesquisa:

- Quais são as causas principais da inversão de *Kanbans* na produção e quais novas tecnologias podem ser implementadas?

O estudo mostrou que a principal causa está relacionada à retirada e à recolocação manual do *Kanban*, o que abre margem para erros. Tecnologias como etiquetas RFID resistentes, leitores automatizados e *middleware* surgem como soluções promissoras e compatíveis com o ambiente produtivo da empresa.

- Como monitorar de forma eficaz o processo de fabricação para prevenir a inversão de *Kanbans* e melhorar a eficiência operacional?

A solução desenvolvida permite o rastreamento contínuo e preciso por meio da integração entre o RFID e os sistemas de gestão (MES e ERP), garantindo o controle do fluxo de peças com alta acurácia e em tempo real, conforme validado pelos especialistas na aplicação do método Delphi.

Dessa forma, os objetivos do trabalho foram alcançados, e as questões de pesquisa foram plenamente respondidas com base teórica, metodológica e técnica sólida.

Como contribuição acadêmica, esta dissertação colabora com a literatura ao oferecer uma abordagem integrada e viável para resolver um problema recorrente em processos logísticos industriais, ampliando a discussão sobre a aplicação de tecnologias emergentes na gestão de sistemas baseados em *Kanban*. A aplicação do método Delphi, com a participação de especialistas, proporcionou um olhar crítico e fundamentado sobre a viabilidade e a aplicabilidade da proposta em ambientes reais.

Como contribuição prática, a proposta apresentada neste artigo oferece às empresas industriais, especialmente do setor automotivo, um modelo estruturado de controle logístico baseado em RFID, que permite reduzir significativamente as falhas relacionadas à inversão de *Kanbans*. Além disso, fornece um caminho possível para a digitalização de processos que ainda dependem de controles físicos manuais, aumentando a eficiência operacional e promovendo a integração entre áreas de produção, logística e planejamento.

Outras organizações também poderão se beneficiar das diretrizes aqui apresentadas, utilizando esta pesquisa como referência para antecipar desafios, avaliar tecnologias compatíveis com seus contextos e estruturar estratégias de mitigação de falhas no fluxo de materiais.

V. REFERÊNCIAS

- ACHETOUI, Z.; MABROUKI, C.; MOUSRIJ, A. A review of spare parts supply chain management. **Jurnal Sistem dan Manajemen Industri**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 67, 2019.
- AGARWAL, S.; AGARWAL, A. Uses, Advantages and Opportunities of Kanban methods in Mechanical Engineering and Product Manufacturing. **International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. p9704, 2020.
- ASENCIOS SORIA, P. S.; MIÑAN OLIVOS, G. S. Lean Logistics to reduce logistics costs in an SME, Lima - 2024. *Em: PROCEEDINGS OF THE LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY*, 2024, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024.
- BADHOTIYA, G. K.; GURUMURTHY, A.; MARAWAR, Y.; SONI, G. Lean manufacturing in the last decade: insights from published case studies. [S. l.]: **Emerald Publishing**, 2024a.
- BADHOTIYA, G. K.; GURUMURTHY, A.; MARAWAR, Y.; SONI, G. Lean manufacturing in the last decade: insights from published case studies. **JOURNAL OF MANUFACTURING TECHNOLOGY MANAGEMENT**, [s. l.], v. 35, n. 4, SI, p. 766–798, 2024b.
- BUENO, R. E.; POHLMANN, M. N.; DOS SANTOS, H. A.; GONÇALVES, R. F. The Procurement 4.0 Contributions to Circular Economy. **Sustainability** (Switzerland), [s. l.], v. 16, n. 14, 2024.
- DURAIVELU, K. Digital transformation in manufacturing industry – A comprehensive insight. *Em: MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS*, 2022, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2022. p. 1825–1829.
- FUENTES-DEL-BURGO, J.; FERNÁNDEZ, J. P. R.; NAVARRO-ASTOR, E. Kanban Applied to Construction: A Literature Review. **Construction Economics and Building**, [s. l.], v. 24, n. 4–5, p. 43–57, 2024.
- GHELICHI, A.; ABDELGAWAD, A. A Study on RFID-based Kanban System in Inventory Management. *Em: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT (IEEM)*, 2014a, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 1357–1361.
- GHELICHI, A.; ABDELGAWAD, A. RFID Applications in Inventory Management Based on Kanban System. *Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (EEE 2014)*, 2014b, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 132–135.
- GRABOWSKA, S.; SANIUK, S.; GAJDZIK, B. Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. **Scientometrics**, [s. l.], v. 127, n. 6, p. 3117–3144, 2022.
- GREEN, J. C.; LEE, J.; KOZMAN, T. A. Managing lean manufacturing in material handling operations. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 48, n. 10, p. 2975–2993, 2010.
- HABEK, P.; LAVIOS, J. J.; GRZYWA, A. Lean Manufacturing Practices Assessment Case Study of Automotive Company. **Production Engineering Archives**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 311–318, 2023.

HIEN, D. N.; DUC, M. L.; TUAN, T. D. Integrating Six Sigma into an Industry 4.0 System for Enhanced Productivity: A Case Study in CNC Processes. **Management and Production Engineering Review**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 44–62, 2024.

JIMÉNEZ-PARTEARROYO, M.; MEDINA-LÓPEZ, A.; JUÁREZ-VARÓN, D. Towards industry 5.0: evolving the product-process matrix in the new paradigm. **Journal of Technology Transfer**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 1496–1531, 2024.

KAMAL, F. Literature Survey on KANBAN: Opportunities and Challenges. **International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 935–945, 2020.

LINSTONE, H. A.; TUROFF, M.; HELMER, O. The Delphi Method Techniques and Applications. [S. l.: s. n.], 2002.

LÍVIA, E.; LOBÃO, F.; ARAÚJO, D. E.; GIL, D. S.; GUIMARÃES, E.; NELSON, D. S.; FILHO, M.; FABRICIO, D. S.; SCHMIDT, C.; GERALDO, D. S.; CORREA, N. DIGITAL TRANSFORMATION IN THE MANAUS INDUSTRIAL HUB (PIM): DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC KANBAN SYSTEM USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR PRODUCTION OPTIMIZATION AND SEQUENCING IN A PIM TAPE COMPANY. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0003-2800-4620>. .

MASMALI, M. Implementation of Lean Manufacturing in a Cement Industry. **Technology & Applied Science Research**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: www.etasr.com. .

MONYE, S. I.; AFOLALU, S. A.; LAWAL, S. L.; OLUWATOYIN, O. A.; ADEYEMI, A. G.; UGHAPU, E. I.; ADEGBENJO, A. IMPACT OF INDUSTRY (4.0) IN AUTOMOBILE INDUSTRY. *Em: E3S WEB OF CONFERENCES*, 2023, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: EDP Sciences, 2023.

NASSAR, V.; VIEIRA, M. L. H. The application of RFID in logistics: A case study of infrastructure and monitoring system of loads in the state of Santa Catarina. **Gestao e Producao**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 520–531, 2014.

PAPADIMITROPOULOU, C.; AMRANI, A. Z.; POWELL, D.; MACEDO, H.; ROMERO, D. Digitally Enhancing Kanban Lean Practice in Support of Just-in-Time Reconfigurable Supply: A Case Study. *Em: IFIP ADVANCES IN INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY*, 2023, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023. p. 69–83.

PATEL, K. K.; THANKI, S. J.; STUDENT, P. G. SYSTEM DYNAMIC MODELLING AND ANALYSIS OF A SINGLE STAGE SINGLE PRODUCT KANBAN PRODUCTION SYSTEM. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, [s. l.], v. 2, 2013. Disponível em: www.ijirset.com.

ROMEIRA, B.; CUNHA, F.; MOURA, A.; DEGEIT, G. /. Development and Application of an e-Kanban System in the Automotive Industry. México: [s. n.], 2021.

SEGURA, Á.; DIEZ, H. V.; BARANDIARAN, I.; ARBELAIZ, A.; ÁLVAREZ, H.; SIMÕES, B.; POSADA, J.; GARCÍA-ALONSO, A.; UGARTE, R. Visual computing technologies to support the Operator 4.0. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 139, p. 105550, 2020. Disponível em: Acesso em: 26 ago. 2024.

SU, W.; MA, L.; HU, K.; ZHANG, L. A Research on Integrated Application of RFID-based Lean Manufacturing. *Em: CCDC 2009: 21ST CHINESE CONTROL AND*

DECISION CONFERENCE, VOLS 1-6, PROCEEDINGS, 2009, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2009. p. 5781–5784.

TABANLI, R. M.; ERTAY, T. Value stream mapping and benefit-cost analysis application for value visibility of a pilot project on RFID investment integrated to a manual production control system-a case study. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY**, [s. l.], v. 66, n. 5–8, p. 987–1002, 2013.

TAN, L.; KONG, T. L.; ZHANG, Z.; METWALLY, A. S. M.; SHARMA, S.; SHARMA, K. P.; ELDIN, S. M.; ZIMON, D. Scheduling and Controlling Production in an Internet of Things Environment for Industry 4.0: An Analysis and Systematic Review of Scientific Metrological Data. [S. l.]: **MDPI**, 2023.

TAN, W. C.; SIDHU, M. S. Review of RFID and IoT integration in supply chain management. **Operations Research Perspectives**, [s. l.], v. 9, 2022.

TIEN, J. M. Toward the Fourth Industrial Revolution on Real-Time Customization. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 127–142, 2020.

XIAOHUA, C.; JUAN, W. A RFID-Based Monitoring System for Abnormal Logistics Events in Internal Material Supply Chain. *Em*: **MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**, PTS 1-2, 2011, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2011. p. 949–954.

XIAOJU, H.; DINGWEI, W. Simulation on RFID-Enable CONWIP Control Strategy for Multi-Echelon Inventory of Supply Chain. *Em*: **PROCEEDINGS OF THE 28TH CHINESE CONTROL AND DECISION CONFERENCE (2016 CCDC)**, 2016, [s. l.], . **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 4526–4530.

YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 56, n. 1–2, p. 848–861, 2018.

ZHANG, S.; HUANG, K.; YUAN, Y. Spare parts inventory management: A literature review. **Sustainability** (Switzerland), [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1–23, 2021.

ZHANG, Y.; JIANG, P. RFID-based smart Kanbans for Just-In-Time manufacturing. **INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS & PRODUCT TECHNOLOGY**, [s. l.], v. 33, n. 1–2, p. 170–184, 2008.

ZHANG, Y. F.; JIANG, P.; HUANG, G. RFID-based smart Kanbans for Just-In-Time manufacturing. **Int. J. Materials and Product Technology**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponível em: <http://www.productivitybyrfid.com/>.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à docente responsável pela disciplina de Metodologia Científica, Maria Claudia Costa De Oliveira Botan, pelo suporte acadêmico, orientação e contribuições fundamentais.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos) responsáveis pelo material incluído no artigo.