

**IMPLEMENTATION OF AUTOMATED TORQUE SYSTEM TO PREVENT FASTENING
FAILURES IN ASSEMBLY LINES VIA IoT**

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE TORQUE AUTOMATIZADO NA PREVENÇÃO DE
FALHAS DE FIXAÇÃO EM LINHAS DE MONTAGEM VIA IoT**

JIM JOHNNY SOUSA FANIS

<https://orcid.org/0009-0007-8747-9681/> jim_johnny@hotmail.com

*FATEC - Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo “Adib Moisés Dib” São
Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.*

DEIVID DA SILVA PRAZO

<https://orcid.org/0009-0004-3797-8018/> deivid_prazo@hotmail.com

*FATEC - Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo “Adib Moisés Dib” São
Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.*

WENDEL DO NASCIMENTO MIRANDA CORREIA

<https://orcid.org/0009-0007-5617-1473/> wendelnmiranda@gmail.com

*FATEC - Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo “Adib Moisés Dib” São
Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.*

WILLIAM APARECIDO CELESTINO LOPES

<https://orcid.org/0009-0009-4437-776X/> wilnatelha@gmail.com

*FATEC - Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo “Adib Moisés Dib” São Bernardo
do Campo, São Paulo, Brasil.*

Recebido em: 27/06/2025

Aprovado em: 28/12/2025

Publicado em: 28/12/2025



RESUMO

Este artigo aborda a implementação de um sistema de controle de torque automatizado em uma empresa de peças injetadas. O estudo motiva-se a erradicar o problema recorrente e custoso do envio de produtos com parafusos ausentes, que gerava custos e impactava negativamente o relacionamento com os clientes. O objetivo principal consiste em implementar e validar um sistema capaz de eliminar a ocorrência de falhas operacionais na linha de montagem. O estudo segue o método Design Science Research (DSR) para guiar suas etapas.

A solução proposta modifica o processo de montagem existente, integrando um contador digital à parafusadeira Desoutter e realizando modificações cruciais no comando elétrico. Isso garante a liberação da peça somente após a contagem correta de 8 pulsos de torque, eliminando a vulnerabilidade a burlas. Um sistema supervisorio utilizando ESP32 e Google Sheets também implementa o monitoramento em tempo real da produção, a coleta de dados operacionais e o controle eficaz de falhas. Os resultados são positivos, alcançando plenamente o objetivo de eliminar as falhas de fixação e a entrega de peças sem os parafusos necessários. A solução demonstra-se eficaz e confiável, validada por testes práticos com especialistas e questionários com usuários. Usuários destacam sua funcionalidade, confiabilidade e o valor do monitoramento em tempo real, gerando benefícios econômicos tangíveis para a empresa. A integração de controle de torque automatizado, Poka-Yoke e monitoramento via IoT prova-se uma abordagem viável para a garantia da qualidade em processos de montagem.

Palavras-chave: automação industrial; garantia da qualidade; prevenção de falhas; sistemas de montagem inteligentes; torque automatizado.

ABSTRACT

This article addresses the implementation of an automated torque control system in an injection molding company. The study aims to eliminate the recurring and costly problem of shipping products with missing screws, which generated costs and negatively impacted customer relationships. The main objective is to implement and validate a system capable of eliminating the occurrence of operational failures on the assembly line. The study follows the Design Science Research (DSR) method to guide its steps. The proposed solution modifies the existing assembly process, integrating a digital counter into the Desoutter screwdriver and making crucial changes to the electrical control. This ensures that the part is released only after the correct counting of 8 torque pulses, eliminating vulnerability to fraud. A supervisory system using ESP32 and Google Sheets also implements real-time production monitoring, operational data collection and effective failure control. The results are positive, fully achieving the objective of eliminating fastening failures and the delivery of parts without the necessary screws. The solution has proven to be effective and reliable, validated by practical tests with experts and user surveys. Users highlight its functionality, reliability and the value of real-time monitoring, generating tangible economic benefits for the company. The integration of automated torque control, Poka-Yoke and monitoring via IoT proves to be a viable approach for quality assurance in assembly processes.

Keywords: industrial automation; quality assurance; failure prevention; intelligent assembly systems; automated torque.

1 INTRODUÇÃO

“Falhas operacionais representam um grande desafio para a produtividade e confiabilidade das empresas, gerando custos adicionais e impactos negativos na cadeia produtiva” (ZAREI et al., 2021). No setor de manufatura, um problema recorrente e prejudicial é o envio de peças sem os parafusos necessários. Essa falha compromete a qualidade do produto e aumenta os gastos com retrabalho e logística, além de afetar o relacionamento comercial. A literatura científica destaca a importância do controle rigoroso de falhas para garantir operações mais eficientes e sustentáveis.

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo de caso sobre uma empresa fabricante de peças injetadas que enfrenta constantemente o problema de envio de componentes sem os parafusos necessários. Esse cenário tem gerado custos extras e afetado a relação com os clientes.

Para solucionar essa questão, propõe-se a implementação de um sistema baseado em torque automatizado e no conceito Poka-Yoke, tecnologias projetadas para prevenir falhas e otimizar processos de montagem. “O torque automatizado aprimora a eficiência, a qualidade e a segurança ao controlar a aplicação da força de torção” (BLACK et al., 2021). Já o Poka-Yoke atua na eliminação de erros humanos e mecânicos, assegurando a qualidade do produto final. Estudos como os de Zarei et al. (2021) e Realyvásquez-vargas et al. (2020) reforçam que: “o controle de falhas é essencial para alcançar operações mais eficazes e sustentáveis”.

Além disso, a integração dessas abordagens com as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (*IoT*), viabiliza não apenas a identificação de falhas, mas também seu monitoramento e aprendizado contínuo que segundo Lazarevic et al. (2019) “promove a garantia da qualidade do produto”. Dispositivos como o ESP32 possibilitam a conexão de máquinas para a coleta e análise de dados em tempo real.

“Essa integração é essencial para criar sistemas de fabricação resilientes, adaptáveis e eficientes” (WOLNIAK, 2024), “permitindo a correção de falhas, incluindo a interrupção ou bloqueio do processo quando necessário” (LAZAREVIC et al., 2019).

Este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e validação de uma solução tecnológica que integra sistema automatizado de controle de torque para parafusadeiras, visando prevenção de falhas nos componentes de fixação.

O método *Design Science Research* (DSR) foi empregado para o desenvolvimento e validação dessa solução inovadora e prática.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Automação e Poka-Yoke: Otimizando a integração de processos

O Poka-Yoke é um dispositivo projetado para prevenir falhas, utilizando sensores inteligentes, dados em tempo real e mecanismos de feedback instantâneo. Seu funcionamento

baseia-se em métodos de rastreamento de tarefas e previsão de intenção, identificando antecipadamente possíveis erros humanos ou mecânicos. O propósito central é evitar falhas em processos ou procedimentos. “Sensores e dispositivos em linhas de montagem detectam e retificam desvios rapidamente, elevando a qualidade do produto e a eficiência operacional” (WOLNIAK, 2024).

Com o avanço da Indústria 4.0, o conceito de Poka-Yoke passou por uma significativa transformação. “As tecnologias habilitadoras oferecidas pela quarta revolução industrial — IoT, Big Data e Machine Learning — carregam consigo o potencial de redefinir o conceito Poka-Yoke, passando de sistemas à prova de erros para sistemas de assistência para operadores de linha” (MARTINELLI et al., 2022).

Essa evolução se concretiza na incorporação da inteligência artificial e do aprendizado de máquina, tornando os sistemas não apenas capazes de identificar erros, mas também de aprender com eles. Isso proporciona maior adaptabilidade diante de cenários de produção em constante mudança. “A incorporação de inteligência artificial e aprendizado de máquina na Indústria 4.0 amplia o Poka-Yoke, permitindo que os sistemas não apenas identifiquem erros, mas também aprendam com eles, promovendo melhoria contínua e adaptabilidade em resposta a cenários de produção em evolução” (WOLNIAK, 2024).

A convergência entre o Poka-Yoke e os princípios da Indústria 4.0 revela uma estratégia de prevenção de falhas orientada por tecnologia, com foco na melhoria contínua e no compromisso com a qualidade. “A integração do Poka-Yoke com a Indústria 4.0 significa uma evolução estratégica, onde a prevenção de erros orientada por tecnologia, melhoria contínua e um compromisso com a qualidade convergem para criar sistemas de fabricação resilientes, adaptáveis e altamente eficientes, posicionando essa integração como uma pedra angular para a excelência no cenário em evolução da produção indústria” (WOLNIAK, 2024).

A relevância desses dispositivos se destaca ainda mais diante dos desafios encontrados em tarefas repetitivas na indústria. “Um grande desafio para a produtividade e assertividade em tarefas repetitivas na indústria é o controle sobre as possíveis falhas humanas nas operações” (REALYVÁSQUEZ-VARGAS et al., 2020). Essas falhas, quando não prevenidas, impactam não apenas a eficiência, mas também a imagem da organização. “Falhas operacionais afetam a

produtividade, além de comprometer a confiabilidade da marca gerando custos diretos e indiretos a empresa” (ZAREI et al., 2021).

Portanto, o papel do Poka-Yoke é fundamental nesse contexto. “O dispositivo Poka-Yoke tem o objetivo de corrigir possíveis falhas nas operações produtivas, interrompendo ou bloqueando o processo se a operação não estiver conforme determinada em seu projeto” (LAZAREVIC et al., 2019).

2.2 Os benefícios do torque automatizado na manufatura

“O torque, definido na física como o momento de uma força, representa a tendência de rotação que uma força aplicada causa em torno de um ponto específico” (WU et al., 2020). Um exemplo prático facilmente compreendido é a ação de apertar um parafuso usando uma chave de boca, onde a força aplicada na chave gera esse torque rotacional. No ambiente de manufatura, parafusos são elementos de fixação mecânica de grande importância. O método mais comum para controlar a pré-carga em parafusos apertados é o controle de torque, sendo crucial aplicar um torque de aperto apropriado. No entanto, o processo de aperto manual pode ser complexo, não linear e sujeito a várias incertezas, o que dificulta alcançar a precisão esperada.

Diante desses desafios e da busca por aprimoramento contínuo, segundo Black et al. (2021) “a automatização do torque emerge como um avanço significativo no setor industrial. Essa tecnologia não apenas melhora os processos existentes, mas também oferece benefícios substanciais em termos de eficiência, qualidade e segurança.”

Em relação à eficiência, a automação do torque contribui diretamente para a produtividade total das linhas de montagem. Ferramentas de aperto motorizadas, que se enquadram nesse contexto, são amplamente utilizadas e contribuem para a produtividade. As tecnologias da Indústria 4.0, das quais a automação faz parte, têm como meta a eficiência operacional e a melhoria do desempenho das tarefas. A automatização de tarefas repetitivas e onerosas, como o aperto manual de torque, elimina trabalho improdutivo e desnecessário, elevando o significado do trabalho e se refletindo positivamente no desempenho dos trabalhadores.

“Ao assumir tarefas repetitivas e fisicamente exigentes, a automatização do torque libera os operadores, permitindo que se dediquem a atividades mais estratégicas e de maior valor agregado” (BLACK et al., 2021). Na Indústria 4.0, os operadores humanos têm outro papel: eles devem se

ajustar e trabalhar em novos ambientes, atuando como responsáveis pela qualidade. Isso envolve receber e avaliar dados em tempo real e tomar ações. Tarefas que exigem maior complexidade cognitiva, como a garantia de qualidade no desenvolvimento de novos produtos, envolvem um alto grau de análise de informações, interdependências e variabilidade de decisão.

2.3 Estrutura e recursos para aplicação de IoT

A Internet das Coisas (*IoT*), um dos pilares da Indústria 4.0, possibilita que dispositivos equipados com sensores ou *tags* RFID monitorem, meçam e coletem informações, enviando esses dados para a internet (*cloud*) através de redes de sensores sem fio, essa troca de dados ocorre de forma automatizada, seguindo os processos configurados nos dispositivos. Ao conectar máquinas e equipamentos à internet, atribuindo a cada objeto uma identidade única que permite a comunicação entre eles, a *IoT* apresenta um potencial significativo para transformar negócios, otimizar processos e reduzir custos. “A implementação da *IoT* em áreas como a gestão de armazéns, por exemplo, ilustra como essa tecnologia pode proporcionar visibilidade em tempo real, aumentar a velocidade e eficiência, diminuir a necessidade de mão de obra manual e prevenir problemas como escassez de inventário” (HAMDY et al., 2022).

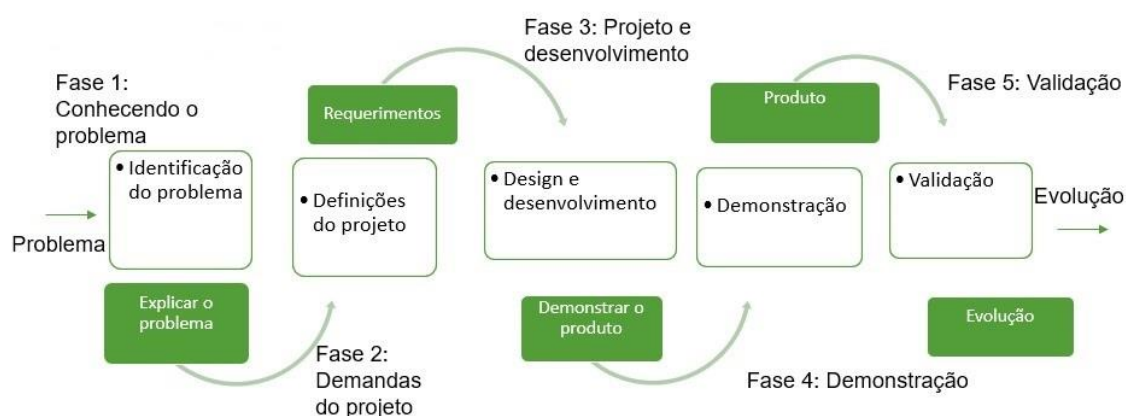
A transmissão de dados entre o microcontrolador ESP32 e a planilha do *Google Sheets* ocorre por meio de conexão Wi-Fi.

O ESP32, após realizar a leitura do sensor os dados são enviados periodicamente para uma planilha no *Google Sheets* por meio de requisições HTTP com parâmetros JSON. No ambiente local. “Uma vez recebidas, as informações são automaticamente registradas em células específicas da planilha, onde são analisadas em tempo real. Essa análise permite a identificação de padrões anômalos e, caso necessário, o acionamento automático de rotinas de alerta para notificar a equipe técnica” (MAIA et al., 2021).

3 METODOLOGIA

O método utilizado no projeto foi o *Design Science Research* (DSR), focando na elaboração e validação de soluções para o problema. O DSR seguirá um processo estruturado em 5 etapas principais conforme figura 1.

Figura 1 – *Design Science Research*



Fonte: Adaptado de PEFFERS et al. (2007)

Essas 5 etapas garantirão que o problema será bem compreendido, a solução será claramente definida e desenvolvida, testada em contextos reais e avaliada rigorosamente (PEFFERS et al., 2007).

3.1 Identificação do problema

A primeira etapa consiste na identificação e compreensão do problema, que neste caso envolveu o desafio de eliminar o problema recorrente e custoso do envio de produtos com parafusos ausentes.

Essa falha operacional representava um grande desafio para a produtividade, gerando custos adicionais e impactos negativos na cadeia produtiva. A motivação central deste estudo surgiu da necessidade de erradicar o problema recorrente e custoso do envio de produtos com parafusos ausentes, uma falha que gerava custos adicionais e impactava negativamente o relacionamento com os clientes.

Inicialmente, a parafusadeira Kolver era utilizada, mas apresentava um alto custo de reparo devido ao desgaste prematuro, resultante da não observação do seu tempo de descanso recomendado, em busca de uma maior cadência produtiva. Os custos associados a essa situação

eram substanciais: em janeiro de 2023, houve uma ocorrência de quebra com um custo de R\$ 3.800 para reparo; e em outubro de 2023, um novo orçamento para conserto de uma parafusadeira quebrada atingiu R\$ 12.900,00. O custo estimado para conserto de uma parafusadeira quebrada era de R\$ 10.689,56, e o tempo estimado de reparo era de 20 dias úteis, o que impactava diretamente a produtividade da linha. A aquisição de uma nova parafusadeira Kolver tinha um custo de R\$ 12.900,00, com um prazo de entrega de 5 a 6 semanas, representando um alto investimento inicial e um longo tempo de espera.

Após a descontinuidade da parafusadeira Kolver, a empresa adaptou uma parafusadeira Desoutter já existente na fábrica. No entanto, este modelo possuía armazenamento para apenas um pulso de torque, o que permitia ao operador "burlar" o dispositivo existente ao usar a chave reset, liberando a peça sem aplicar todos os 8 parafusos necessários. Esta falha gerou diversas ocorrências de envio de peças incompletas, comprometendo a qualidade do produto e aumentando os gastos com retrabalho e logística, além de afetar o relacionamento comercial.

O processo de montagem na empresa utilizava um dispositivo, projetado para garantir 8 torques e só liberar a peça após essa contagem conforme indicado na figura 2.

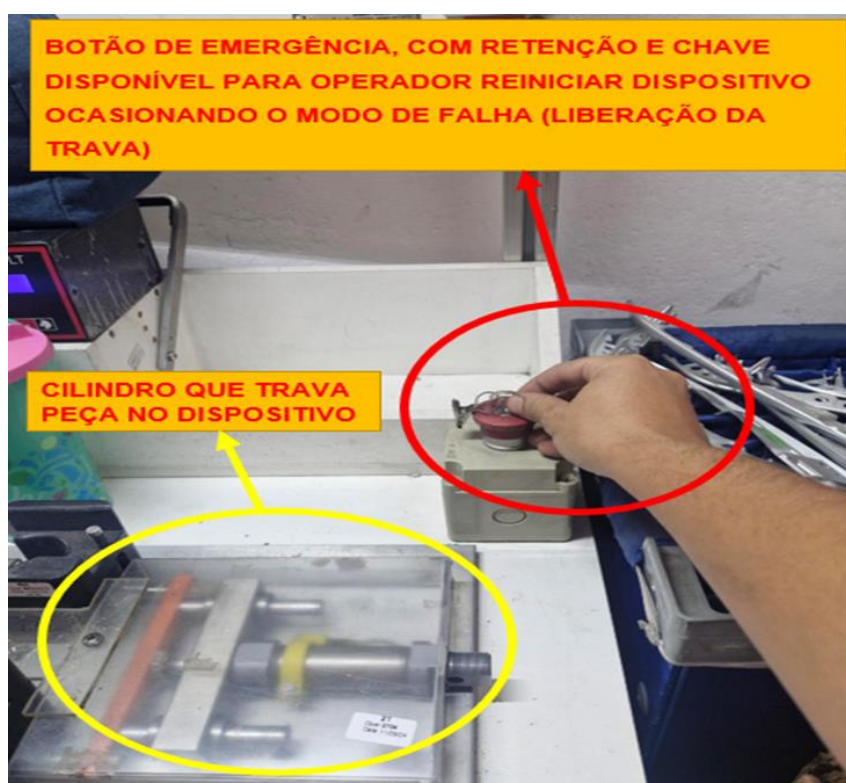
Figura 2 – Peça sem parafuso



Fonte: Do Autor (2025)

Inicialmente, a parafusadeira Kolver era utilizada, mas apresentava alto custo de reparo devido ao desgaste prematuro causado pela não observação ao seu tempo de descanso, conforme especificação do fabricante, buscando maior cadência produtiva. Em substituição, adaptou-se a parafusadeira Desoutter, já utilizada na fábrica. No entanto, este modelo possuía armazenamento para apenas 1 pulso de torque, permitindo que o operador "burlasse" o dispositivo existente ao usar a chave reset, liberando a peça sem aplicar todos os 8 parafusos. Esta falha gerou diversas ocorrências de envio de peças incompletas conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 – Modo de falha

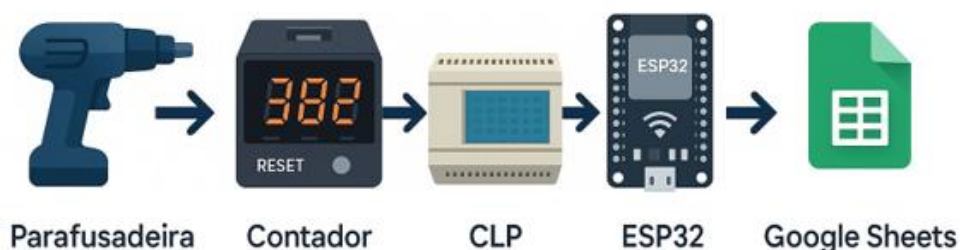


Fonte: Do Autor (2025)

3.2 Definições do projeto

A segunda fase define os requisitos da solução para solucionar a falha decorrente da possibilidade de burlar o dispositivo de controle e a inviabilidade de reparo ou alto custo de aquisição da parafusadeira original, propôs-se a implementação e validação de um sistema capaz de eliminar essa ocorrência. Decidiu-se manter a parafusadeira Desoutter, integrando-a a um contador digital. Este contador seria responsável por contabilizar os 8 apertos necessários e validar, junto à lógica do comando elétrico existente, a condição para liberação da peça conforme figura 4.

Figura 4 – Estrutura de funcionamento



Fonte: Do Autor (2025)

Além da alteração no comando elétrico, definiu-se a implementação de um sistema de monitoramento utilizando ESP32 e Google Sheets. Este sistema visaria fornecer acesso a informações de produção em tempo real, permitindo controle eficiente da quantidade de peças produzidas, análise de falhas operacionais, rastreabilidade e melhoria contínua do processo produtivo. O sistema remoto se basearia na comunicação entre o equipamento e a internet via ESP32, enviando sinais de estado da máquina (peça pronta ou parada) para o Google Sheets, onde os dados seriam registrados, analisados e visualizados. A solução proposta focou na modificação do processo de montagem existente, integrando componentes. O objetivo geral era eliminar o problema do envio de peças com parafusos faltantes.

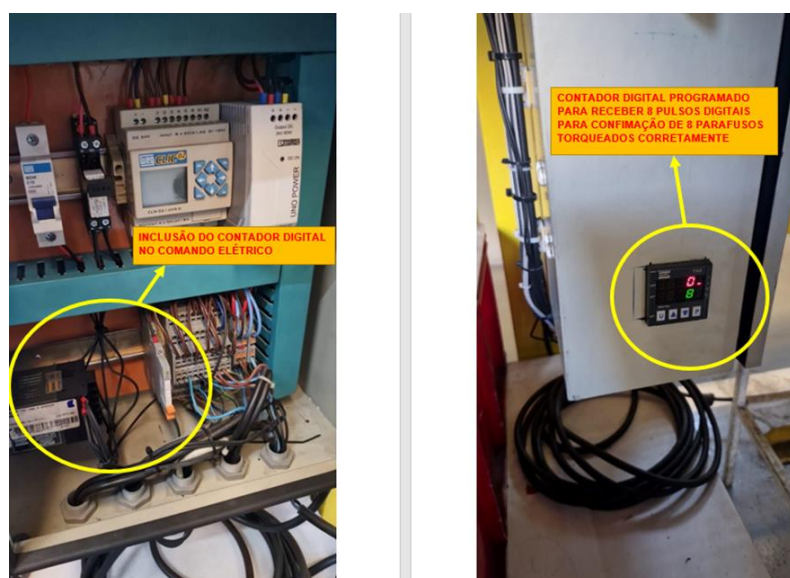
3.3 Desenvolvimento do projeto

O desenvolvimento da solução focou em corrigir a falha que permitia a liberação incorreta da peça e implementar o sistema de monitoramento. Integrar um Temporizador e Contador Digital Coel T42 ao comando elétrico do dispositivo de montagem foi o primeiro passo. Este contador foi configurado para receber e acumular 8 pulsos digitais vindos do controlador da parafusadeira. Uma modificação elétrica crucial foi realizada na saída de liberação da peça no CLP. Com essa alteração, o sinal de liberação passou a ser controlado pelo contador digital, garantindo que a peça só fosse liberada após o registro completo dos 8 pulsos, eliminando a possibilidade de burlar o sistema original.

Outro modo de falha potencial identificado foi a possibilidade de operar a parafusadeira sem que a peça estivesse corretamente fixada. Para mitigar isso, uma segunda alteração no comando elétrico foi implementada, assegurando que a parafusadeira só funcionasse após a peça estar firmemente posicionada. Este controle duplo (contagem de pulsos e fixação da peça) foi a chave

para resolver os problemas de liberação indevida e aparafusamento em peças não fixadas conforme indicado na figura 5.

Figura 5 – Contador incluso no CLP



Fonte: Do Autor (2025)

Paralelamente, o sistema supervisor foi desenvolvido utilizando o microcontrolador ESP32. O ESP32 foi programado para receber sinais de um relé conectado à máquina, indicando seu estado. Ele registra a data e hora desses eventos e os envia para uma planilha no Google Sheets via conexão Wi-Fi.

Durante o desenvolvimento da solução, foram enfrentados desafios técnicos relevantes, como a integração do contador digital Coel T42 à parafusadeira Desoutter e ao CLP. A programação do ESP32 para comunicação com o Google Sheets exigiu lógicas específicas para assegurar a transmissão estável dos dados. Também foi necessário realizar treinamentos com os operadores para superação da resistência inicial. Apesar dos desafios, todas as etapas foram executadas com sucesso, atingindo o objetivo de eliminar a falha operacional.

3.4 Demonstração do funcionamento

A quarta etapa contempla a demonstração do artefato em cenários práticos, que envolveu a demonstração do sistema em operação com a parafusadeira Desoutter, o contador digital, o comando elétrico modificado, o ESP32 e a planilha Google Sheets.

A demonstração do sistema em operação comprovou a efetividade da solução. A liberação da peça ocorreu somente após o registro correto dos 8 apertos. A segunda camada de segurança, que impedia o funcionamento da parafusadeira sem a fixação da peça no berço, funcionou como planejado conforme figura 6.

Figura 6 – Funcionamento

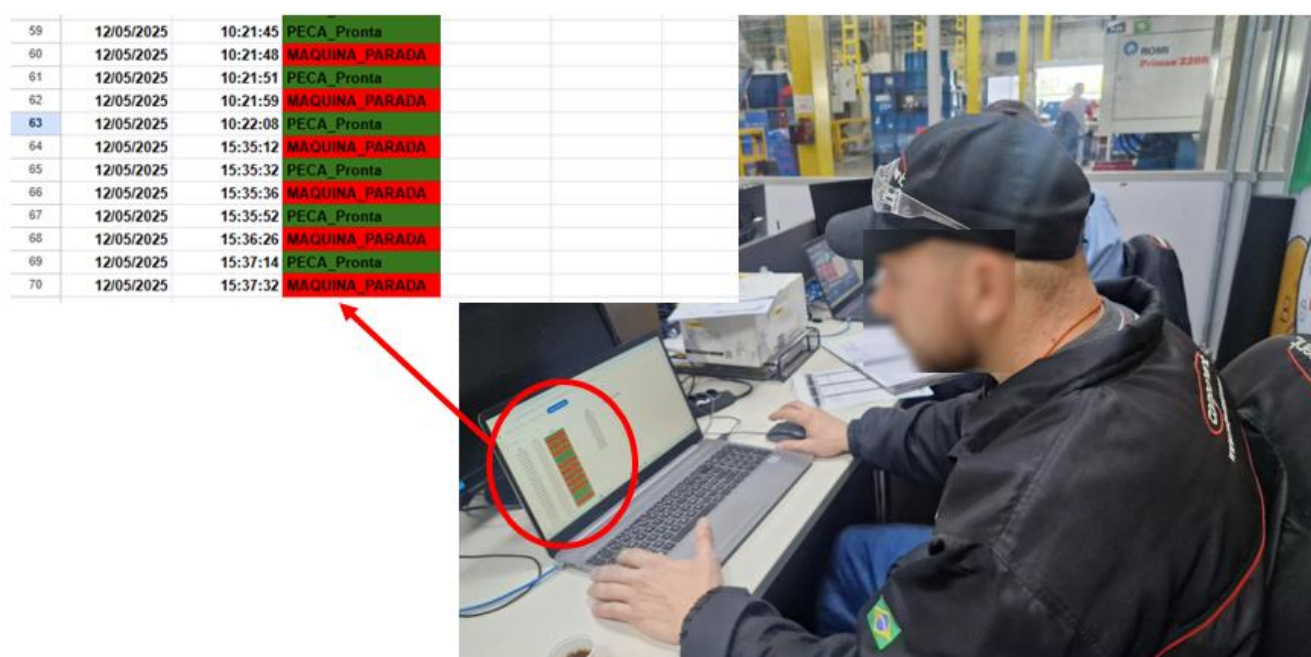


Fonte: Do Autor (2025)

O sistema supervisor foi demonstrado monitorando a produção em tempo real. O ESP32 interpretou os sinais do relé da máquina e registrou o status (Peça pronta ou Máquina parada) com data e hora na planilha Google Sheets. Esta visualização dinâmica permitiu acompanhar o processo remotamente. A planilha se tornou um registro cronológico dos eventos, permitindo análises de

produtividade, paradas e tempo de ciclo. O sistema supervisor, utilizando ESP32 e Google Sheets, demonstrou com clareza sua capacidade de monitoramento remoto e registro de eventos conforme figura 7.

Figura 7 – Preenchimento da planilha Google Sheets



Fonte: Do Autor (2025)

3.5 Avaliação e validação do funcionamento

A quinta etapa corresponde à avaliação e validação da solução, na qual buscou-se assegurar que a solução fosse eficaz na prevenção de falhas e atendesse aos objetivos propostos no ambiente real.

O foco foi verificar se a alteração no processo eliminou o erro de envio de peças com parafusos faltantes. A validação foi conduzida através de testes práticos no ambiente de produção,

com a participação de especialistas como gerente industrial e supervisor de montagem, para avaliar a eficácia em um cenário operacional autêntico.

Adicionalmente, um questionário foi aplicado a seis profissionais que interagem diariamente com o novo sistema (Supervisor de Manutenção, Supervisor de Montagem, Supervisor de Processos, Líder de Montagem, Auxiliar de Montagem e Inspetor de Qualidade). O questionário buscou capturar a percepção dos usuários sobre a eficácia da solução na resolução do problema, otimização dos processos e nível de satisfação geral.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento do projeto

Durante o desenvolvimento do sistema de controle de torque automatizado para prevenção de falhas de fixação, a equipe enfrentou desafios técnicos significativos. O primeiro grande desafio foi a integração do temporizador e contador digital Coel T42 à parafusadeira Desoutter e ao Comando Lógico Programável (CLP). Essa integração foi crucial para garantir que a peça fosse liberada somente após o registro completo dos oito pulsos de torque necessários, eliminando a vulnerabilidade à burla que existia no sistema anterior.

Outro obstáculo técnico envolveu a programação do microcontrolador ESP32 para assegurar uma comunicação estável com a planilha do Google Sheets, fundamental para o monitoramento em tempo real. Além das questões técnicas, houve uma resistência inicial por parte dos operadores em relação à nova plataforma. Apesar dessas dificuldades, todas as etapas do desenvolvimento foram executadas com sucesso, permitindo alcançar o objetivo principal de eliminar a falha operacional de envio de produtos com parafusos ausentes. As modificações no comando elétrico e a implementação de uma segunda camada de segurança, que impedia o funcionamento da parafusadeira sem a peça corretamente fixada, foram essenciais para a robustez da solução.

4.2 Demonstração de funcionamento do sistema automatizado de torque

A demonstração prática do sistema em operação confirmou a efetividade da solução desenvolvida. Foi comprovado que a liberação da peça ocorria apenas após o registro correto dos oito apertos de torque, conforme o objetivo principal do projeto. A segunda camada de segurança,

que impedia a ativação da parafusadeira sem a fixação adequada da peça no berço, funcionou como planejado, reforçando a prevenção de falhas.

Adicionalmente, o sistema supervisor, que utiliza o microcontrolador ESP32 e a planilha do Google Sheets, foi demonstrado com sucesso. O ESP32 interpretou os sinais do relé da máquina e registrou o status (Peça pronta ou Máquina parada) com data e hora na planilha, permitindo o monitoramento remoto e em tempo real da produção. Essa visualização dinâmica transformou a planilha em um registro cronológico de eventos, possibilitando análises de produtividade, identificação de paradas e cálculo do tempo de ciclo, o que otimiza o controle operacional e a tomada de decisões.

4.3 Validação e avaliação do sistema automatizado de torque na empresa de peças injetadas

A validação da solução foi realizada através de testes práticos no ambiente de produção com a participação de especialistas, como o gerente industrial e o supervisor de montagem, que confirmaram a eficácia do sistema em um cenário operacional autêntico.

Complementarmente, um questionário foi aplicado a seis profissionais que interagem diariamente com o novo sistema (Supervisor de Manutenção, Supervisor de Montagem, Supervisor de Processos, Líder de Montagem, Auxiliar de Montagem e Inspetor de Qualidade).

Utilizando uma escala de 1 (Extremamente Insatisfeito/Ineficaz) a 10 (Extremamente Satisfeito/Eficaz). A combinação de testes práticos e feedback dos usuários permitiu uma avaliação abrangente. As médias obtidas para cada aspecto avaliado foram apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Média avaliação

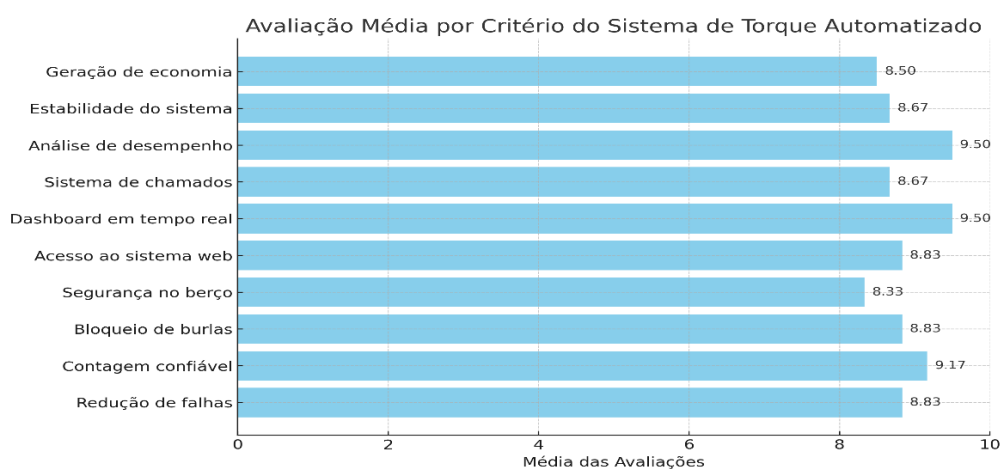
Critério Avaliado	Média
Eliminação da falha de parafusos faltantes	8,83
Confiabilidade do contador digital	9,17
Prevenção de liberação indevida (burla)	8,83
Travamento por falta de fixação da peça	8,33
Monitoramento em tempo real (identificação de falhas)	9,50
Rastreamento e histórico produtivo	8,67
Benefícios econômicos percebidos	8,50

Fonte: Do Autor (2025)

Notou-se que os maiores destaques estavam na confiabilidade e no valor do monitoramento em tempo real. Tais achados corroboraram estudos como os de BLACK et al. (2021), que apontam ganhos de produtividade com a automatização do torque, e de MARTINELLI et al. (2022), que destacam a importância da integração entre operação e dados.

Apesar da amostra limitada, os resultados foram consistentes com a literatura e demonstraram que a solução atendeu aos objetivos propostos de forma eficaz.

Figura 8 – Gráfico de Avaliação



Fonte: Do Autor (2025)

A solução proposta neste estudo, baseada na modificação do processo de montagem existente por meio da integração de um sistema de controle de torque automatizado e um Poka-

Yoke com monitoramento via IoT, demonstrou ser uma abordagem robusta e viável para a garantia da qualidade. Um dos pontos mais relevantes do projeto foi a economia financeira significativa alcançada. Em contraste com os altos custos de reparo ou aquisição de equipamentos anteriores, a adaptação proposta teve um custo consideravelmente menor. A principal peça adicionada para permitir a contagem de torque, o Contador COEL T42, teve um custo de apenas R\$ 383,14.

Os resultados obtidos confirmaram plenamente a eficácia e confiabilidade da solução proposta, eliminando as falhas de fixação e o envio de peças sem os parafusos necessários. A validação do sistema, realizada por meio de testes práticos com especialistas e questionários com seis profissionais que interagiam diariamente com o novo sistema, destacou a funcionalidade e os benefícios. As avaliações dos usuários foram altamente positivas, evidenciando:

A funcionalidade do sistema em eliminar a falha de parafusos faltantes, com uma nota média de 8,83.

A alta confiabilidade do sistema, com uma nota média de 9,17.

O valor estratégico do monitoramento em tempo real para a gestão, com uma nota média de 9,50.

Os benefícios econômicos percebidos, com uma nota média de 8,50.

Esses avanços geraram benefícios econômicos tangíveis para a empresa, resolvendo um problema recorrente e custoso ao reduzir significativamente retrabalhos e perdas, e evitar os altos custos de reparo ou substituição de equipamentos. A integração do controle de torque automatizado, a incorporação de um Poka-Yoke e o monitoramento via IoT provou ser uma abordagem eficaz e confiável para a garantia da qualidade em processos de montagem, abordando o controle sobre possíveis falhas humanas e mecânicas.

5 CONCLUSÃO

A motivação central para este estudo foi a necessidade de erradicar o problema recorrente e custoso do envio de produtos com parafusos ausentes, uma falha que gerava custos adicionais e impactava negativamente o relacionamento com os clientes. Este problema comprometia a qualidade do produto e aumentava os gastos com retrabalho e logística.

O objetivo principal deste trabalho foi implementar e validar um sistema capaz de eliminar a ocorrência de falha operacional na linha de montagem, garantindo a integridade dos produtos entregues. Para alcançar esse objetivo, a proposta do artigo centrou-se na modificação do processo

de montagem existente por meio da integração de um sistema de controle de torque automatizado e um sistema Poka-Yoke com monitoramento via IoT. Especificamente, a solução envolveu a integração de um contador digital Coel T42 à parafusadeira Desoutter utilizada na linha e a realização de modificações cruciais no comando elétrico do dispositivo. Essas alterações foram implementadas para assegurar que a liberação da peça ocorresse somente após a contagem correta de 8 pulsos de torque, eliminando a vulnerabilidade à burla e também garantindo que a parafusadeira só funcionasse com a peça corretamente fixada. Adicionalmente, foi implementado um sistema supervisório utilizando ESP32 e Google Sheets, possibilitando o monitoramento em tempo real da produção, coleta de dados operacionais e controle eficaz de falhas.

Os resultados obtidos demonstraram ser positivos, confirmando plenamente a eficácia e confiabilidade da solução proposta, e alcançando com sucesso o objetivo de eliminar as falhas de fixação e o envio de peças sem os parafusos necessários. A validação da solução, realizada através de testes práticos com especialistas (como gerente industrial e supervisor de montagem) e questionários com usuários (seis profissionais que interagem diariamente com o sistema), comprovou sua funcionalidade, confiabilidade e o valor do monitoramento em tempo real.

As avaliações dos usuários foram altamente positivas, evidenciando a funcionalidade do sistema em eliminar a falha (nota média de 8,83), a alta confiabilidade do sistema (nota média de 9,17) e o valor estratégico do monitoramento em tempo real para a gestão (nota média de 9,50). Além dos ganhos operacionais e de qualidade, a implementação gerou benefícios econômicos tangíveis para a empresa, resolvendo um problema recorrente e custoso ao reduzir significativamente retrabalhos e perdas, e evitar os altos custos de reparo ou substituição de equipamentos.

A integração do controle de torque automatizado, a incorporação de um Poka-Yoke e o monitoramento via IoT demonstrou ser uma abordagem robusta e viável para a garantia da qualidade em processos de montagem, abordando eficazmente o controle sobre possíveis falhas humanas e mecânicas. Este estudo conclui que a solução desenvolvida é não apenas eficaz, confiável e tecnicamente viável, mas também um modelo promissor para o alcance de excelência operacional e prevenção de falhas em ambientes industriais modernos, podendo servir como referência para iniciativas semelhantes em busca de maior produtividade e assertividade.

REFERÊNCIAS

BLACK, N. L.; NEUMANN, W. P.; NOY, I. (Eds.). **Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021): Volume III: Sector Based Ergonomics**. Cham: Springer International Publishing, 2021. v. 221. DOI: 10.1007/978-3-030-74608-7.

HAMDY, W.; AL-AWAMRY, A.; MOSTAFA, N. Warehousing 4.0: A proposed system of using node-red for applying internet of things in warehousing. **Sustainable Futures**, v. 4, p. 100069, 2022. DOI: 10.1016/j.sftr.2022.100069.

LAZAREVIC, M.; MANDIC, J.; SREMČEV, N.; VUKELIC, D.; DEBEVEC, M. A systematic literature review of Poka-Yoke and novel approach to theoretical aspects. **Journal of Mechanical Engineering**, [S.l.], v. 65, n. 7, p. 477-494, 2019. DOI: 10.5545/sv-jme.2019.6056.

MAIA, L. F. G.; AMICI, T. T.; SANTOS, J. R. dos; CAMUSSO, D.; FERNANDES, C. L. M. Coleta e análise de dados em tempo real das medições de variáveis em transformadores de potência utilizando tecnologia IoT. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, São Paulo, v. 13, n. 36, p. 536-553, 2021.

MARTINELLI, M.; LIPPI, M.; GAMBERINI, R. Poka Yoke Meets Deep Learning: A Proof of Concept for an Assembly Line Application. **Applied Sciences**, v. 12, n. 21, p. 11071, nov. 2022. DOI: 10.3390/app122111071.

PEFFERS, K. et al. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, dez. 2007. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

REALYVÁSQUEZ-VARGAS, A.; ARREDONDO-SOTO, K. C.; BLANCO-FERNANDEZ, J. et al. Work Standardization and Anthropometric Workstation Design as an Integrated Approach to Sustainable Workplaces in the Manufacturing Industry. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3728, 2020. DOI: 10.3390/su12093728.

WOLNIAK, R. The usage of Poka-Yoke in Industry 4.0 conditions. **Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series**, Gliwice, n. 191, p. 614-628, 2024. DOI: 10.29119/1641-3466.2024.191.39.

WU, Z.; ZHANG, G.; DU, W.; WANG, J.; HAN, F.; QIAN, D. Torque control of bolt tightening process through adaptive-gain second-order sliding mode. **Measurement and Control**, v. 53, n. 7-8, p. 1131-1143, 2020. DOI: 10.1177/0020294020932354.

ZAREI, E.; KHAN, F.; ABBASSI, R. Importance of human reliability in process operation: A critical analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 211, p. 107607, jul. 2021. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107607.