

Implantação de um sistema *error proofing* baseado em DMAIC e FMEA utilizando sistema de visão

André N. Makoski* Alexandre F. de M. Filho**
Amauri A. Assef***

*Programa de Pós-Grad. em Eng. Elétrica e Inf. Industrial (CPGEI),

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil (e-mail: andre.makoski@gmail.com)

**Instituto Federal do Paraná (IFPR), Curitiba, Brasil (e-mail: alexandre.moraes@ifpr.edu.br)

***Programa de Pós-Grad. em Eng. Elétrica e Inf. Industrial (CPGEI), Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT),
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil (e-mail: amauriassef@utfpr.edu.br)

Abstract: Identifying defects as soon as they occur is an essential strategy to guarantee product quality and to avoid losses in the production process. The identification of defects at source instead of detection after the added value has been increased in the industry recently, especially with the advancement of technology in the context of Industry 4.0. This paper specifically aims to develop an error proofing solution using the DMAIC framework as an improvement process and FMEA as an engineering tool. After using the framework to map the process, a failure mode for correction through a vision system was chosen. The results generated by this experiment proved to be satisfactory. The proposed model can be explored by professionals and students who seek to identify losses and eliminate them in business processes.

Resumo: Identificar defeitos assim que eles ocorram é uma estratégia essencial para garantia da qualidade dos produtos e para evitar perdas no processo produtivo. A identificação de defeitos na fonte ao invés da detecção após o valor adicional ter sido agregado tem crescido na indústria recentemente, especialmente com o avanço da tecnologia no contexto da Indústria 4.0. Este artigo visa especificamente desenvolver uma solução *error proofing* utilizando o *framework* DMAIC como processo de melhoria e o FMEA como ferramenta de engenharia. Após utilizar o *framework* para mapear o processo, foi escolhido um modo de falha para correção de defeitos na montagem de discos de embreagem através de um sistema de visão. Os resultados gerados por esse experimento se mostraram satisfatórios. O modelo proposto poderá ser explorado por profissionais e estudantes que buscam identificar perdas e mitigá-las nos processos de negócios.

Keywords: Error proofing; Poka-Yoke; DMAIC; Lean Six Sigma; Industry 4.0.

Palavras-chaves: Prova de erro; Poka-Yoke; DMAIC; Lean Six Sigma; Indústria 4.0.

1. INTRODUÇÃO

Na era da globalização e em um cenário cada vez mais acirrado, a indústria vem utilizando novas ferramentas e técnicas de automação com o intuito de aprimorar a qualidade dos produtos e evitar perdas nos processos produtivos (Turetsky et al., 2020). A qualidade é uma estratégia que pode ser compreendida como oferecimento de valor ao cliente e é uma questão importante e imprescindível, principalmente dentro do cenário evolutivo da Indústria 4.0. Dessa forma, o aumento da qualidade dos produtos, suportado pelo avanço de novas tecnologias, tem garantido às empresas redução de perdas, desperdícios, custos, prazos de entrega, retrabalho e reclamações, gerando aumentos significativos no seu desempenho, resultados e competitividade (Barrera, 2019).

O defeito é considerado uma dessas perdas, gerando custos com não qualidade. Visando a redução de defeitos, Shingo (1996) desenvolveu o conceito Poka-Yoke, também conhecido como *error proofing*, que, basicamente, é uma ferramenta para

identificar e evitar defeitos. Essa ferramenta representa mecanismos ou procedimentos utilizados para prevenção de erros em produtos, processos ou sistemas (Belu et al., 2015).

Um caminho interessante para garantir que problemas potenciais possam ser percebidos durante toda a etapa de desenvolvimento e montagem do produto é a integração de processos. Como exemplo, a integração entre a metodologia analítica de Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA - *Process Failure Mode Effects Analysis*), Poka-Yoke e Jidoka possibilita uma otimização na eliminação de defeitos no processo, melhorando a qualidade e confiabilidade. O FMEA ajuda a prever e prevenir problemas por meio de métodos de controle e detecção, enquanto o Poka-Yoke e Jidoka trabalham na identificação e correção de erros, antes que se tornem defeitos (Loureiro et al., 2014; Psarommatis et al., 2019).

Dentre as estratégias gerenciais para aumentar o desempenho e a lucratividade das empresas, destaca-se o Seis Sigma, que vem se consolidando nas últimas décadas como um dos desenvolvimentos mais importantes para a gestão da

qualidade, resolução de problemas e melhoria de processos. Essa estratégia vem sendo apoiada por diferentes metodologias, como, por exemplo, o DMAIC, que apresenta uma sequência típica de ferramentas gráficas, práticas e analíticas bem definidas para a resolução estruturada de problemas com foco na melhoria contínua.

Este trabalho propõe a aplicação do *framework* DMAIC em conjunto com o FMEA para o desenvolvimento de uma solução *error proofing* utilizando sistema de visão. A avaliação do sistema a prova de erro foi realizada na montagem de discos de embreagem no âmbito de uma indústria de veículos pesados para construção civil e agricultura, que adota desde 2001 o programa Seis Sigma como principal programa de melhoria de processo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir, os principais métodos empregados neste trabalho são apresentados.

2.1 Poka-Yoke

O Poka-Yoke foi introduzido por Shingeo Shingo, em 1961, com o intuito de prevenir a linha de produção da empresa Toyota dos erros causados pela desatenção e, por isso, também é conhecido como *error-proofing*, *mistake-proofing* ou ainda *fail-safe*. Um dispositivo Poka-Yoke tem o intuito de ajudar as pessoas a fazer o certo da primeira vez. O método é baseado em mecanismos que evitam a ocorrência de um erro ou defeito, ou torna qualquer erro ou defeito óbvio à primeira vista (Shingo, 1996). O autor ainda diferencia defeito de erro: o erro é inevitável, pois pessoas não ficam concentradas o tempo todo e estão sujeitas ao erro; já os defeitos resultam de permitir que um erro chegue ao cliente e são totalmente evitáveis.

2.2 Jidoka

Outro conceito que corrobora para identificação e eliminação de defeitos é o Jidoka. Segundo o *website* da Toyota, Jidoka é a capacidade de detectar uma anomalia rapidamente e interromper imediatamente o trabalho, evitando desperdícios, otimizando o processo e garantindo a qualidade do processo final (Toyota, 2021). Um dos principais problemas enfrentados pelo fundador da Toyota, Sakichi Toyoda, era que as máquinas automáticas não interrompiam a produção quando uma situação anormal acontecia, levando assim a um acúmulo de defeitos (Iwao, 2017; Nunes et al., 2017). Para eliminar esse risco devido ao aumento da produção, a Toyota criou então o conceito Jidoka, difundido na literatura como autonomia, ou seja, a automação em conjunto com o trabalho humano. Segundo Taiichi Ohno, "O Jidoka dá inteligência à máquina" (Womak et al., 1990; Audenino, 2012).

Assim como a Indústria 4.0, o Jidoka passou por diferentes fases. Atualmente, a quarta geração é chamada de "Jidoka 4.0 Systems", caracterizada pelo uso dos mais recentes *softwares* e *hardwares*, além de sensores, atuadores e controladores capazes de não apenas identificar, mas também prever defeitos

e corrigi-los antes mesmo que ocorram (Romero et al., 2019; Deuse et al., 2020).

2.3 FMEA

O FMEA é uma ferramenta de engenharia que identifica, prioriza, elimina e previne problemas potenciais em um determinado produto, processo ou sistema, fazendo que com este seja isento de erros (Chao & Ishii, 2007). Em síntese, o grande objetivo da ferramenta é fazer com que as falhas sejam eliminadas antes da sua aparição, antes de chegar ao cliente ou consumidor. A metodologia é composta por quatro fases. A primeira delas é identificar todos os potenciais modos de falha. A segunda é analisar todas as causas e efeitos para cada modo de falha. A terceira é ranquear os modos atrás do número potencial de risco RPN (*Risk Potencial Number*). Por fim, a quarta fase é tomar ações para os riscos mais elevados (Huang et al., 2020).

2.4 Seis Sigma e DMAIC

A metodologia Seis Sigma (Six Sigma - SS), pode ser considerada nas últimas décadas um dos desenvolvimentos mais importantes para a gestão da qualidade e melhoria de processos (Garza-Reyes et al., 2010; Jirassukprasert et al., 2014; Smętkowska & Mrugalska, 2018). O Seis sigma é uma abordagem que busca identificar e eliminar causas de defeitos ou erros em um processo de negócio, concentrando-se nas saídas do processo que são críticas aos olhos do cliente (Jirassukprasert et al., 2014; Antony et al., 2016).

O método DMAIC é considerado um aspecto chave para todo sucesso da aplicação do Seis Sigma, possuindo cinco fases que devem ser seguidas rigorosamente, a fim de que seja alcançado o resultado no projeto, além de ações que devem ser feitas para completar cada fase (Werkema 2012; Pande et al., 2000). As cinco fases descritas a seguir são: Definir (*Define*), Medir (*Measure*), Analisar (*Analyze*), Melhorar (*Improve*) e Controlar (*Control*).

2.4.1 Definir

A primeira fase do DMAIC, *Define*, é a fase de definição. Antes de iniciar o projeto é preciso estar claro qual o problema que será estudado. Faz parte dessa etapa a definição do problema, a montagem da equipe e a voz do cliente (VOC - *Voice of Cliente*). Além disso, também faz parte dessa etapa a definição do escopo, ou seja, delimita-se o projeto definindo o que o projeto irá ou não incluir (Werkema, 2012).

2.4.2 Medir

Na segunda fase, *Measure*, mede-se o problema. O objetivo dessa fase é medir o estado atual e traçar a meta de melhoria do projeto. São testados os equipamentos de medidas, escolhidos os parâmetros de avaliação, criado o plano de coleta de dados, folhas de registro de coleta etc. (Pande et al., 2000).

2.4.3 Analisar

A terceira fase *Analyze* é essencial ao projeto, pois são analisadas e identificadas as causas prioritárias que afetam o problema. Caso essa etapa não seja bem conduzida, a solução não vai resolver o problema da fase Definir ou não irá atingir o objetivo da fase Medir. Para Krishnan e Prasath (2013), um processo de negócio é analisado para identificar e mapear as causas raízes dos defeitos ou erros (Adams et al., 2003).

2.4.4 Implementar

Na quarta fase, *Improve*, implementa-se e melhora o processo. Uma vez que foram identificados os problemas a serem trabalhados e as equipes do projeto estão satisfeitas com seus dados e determinaram que análises adicionais não irão aumentar a compreensão do problema, é hora de passar para o desenvolvimento da solução (Werkema, 2012). Na última fase são definidas práticas para controlar e manter as mudanças implementadas (Antony et al., 2016).

2.4.5 Controlar

A última fase do projeto DMAIC, *Control*, garante que as melhorias sejam sustentadas e que o desempenho contínuo seja monitorado (Jirassukprasert et al., 2014). Nessa fase é avaliada o alcance da meta e são elaborados os documentos finais do projeto. Para Krishnan e Prasath (2013), é uma mini versão do gerenciamento do processo, na qual são elaborados os documentos de como a equipe deseja passar a estrutura desenvolvida para os funcionários (Werkema, 2012).

2.5 Lean Six Sigma

Na sua última versão, a ISO 9001:2015 estabeleceu, dentre outros requisitos, que a organização visando a satisfação do cliente deve identificar oportunidades para melhorias e implementações de ações necessárias para atender seus requisitos. Nessa linha, a empresa em que este estudo foi aplicado adota desde 2001 o Seis Sigma e em 2014 implementou o TPS (Toyota *Production System*), também conhecida como Manufatura Enxuta ou *Lean Manufacturing* (Yadav & Desai, 2016). Para Rocha (2016), enquanto a metodologia Seis Sigma normalmente está voltada à qualidade reduzindo a variação do processo, o *Lean Manufacturing* é tido como uma filosofia operacional, buscando eliminar perdas com não qualidade. A utilização das duas metodologias em conjunto é conhecida como *Lean Six Sigma* (LSS) e é essencial para resolver problemas encontrados pelas organizações no mercado competitivo atual (Pillai et al., 2012; Psychogios & Tsironis, 2012; Raval & Kant, 2017; Vaishnavi & Suresh, 2020). Salah, Rahim e Carreto (2010) reforçam que para ter sucesso na integração das duas ferramentas é essencial a utilização do DMAIC como *framework* padrão.

2.6 Sistema de visão

Um sistema de visão é um conjunto de técnicas visuais de controle de qualidade, constituídos por iluminação, lentes,

câmera, filtros e *software* de controle. Os sistemas de visão podem oferecer ótimos resultados em inspeções, evitando o contato físico com o objeto em análise. Segundo Feliciano et al. (2005), isso se deve ao fato desses equipamentos poderem eliminar aspectos como fadiga, lentidão e subjetividade, aspectos esses associados à inspeção humana. Ainda segundo o autor, é possível dividir um sistema de visão ou medição, conforme exemplificado no diagrama em blocos da Fig. 1.

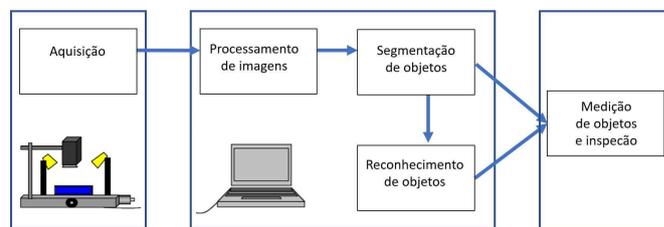


Fig. 1 Sistema de visão baseado em computador pessoal.

O modelo explicado por Feliciano et al. (2005) para medição e inspeção de objetos é baseado em computador pessoal (PC - *Personal Computer*), em que o processamento da imagem é realizado pela unidade de processamento central (CPU - *Central Process Unit*). Nessa linha, Di Leo et al. (2017) apresentam uma solução utilizando a aquisição de imagem com duas câmeras e realizando o processamento com o software Labview. O processamento de imagem, vídeo, áudio, textos e fala utilizam métodos de aprendizagem profunda (*Deep Learning*), que vem se concretizando como o estado da arte em processamento de imagens (LeCun et al., 2015; Semeniuta et al., 2018).

No entanto, os sistemas de visão têm sido utilizados na indústria para além da inspeção automática, detecção de defeitos e medições, como, por exemplo, orientação robótica (Semeniuta et al., 2018). Para tanto, cresceu a necessidade da utilização de sistemas de visão embarcados, e não baseados em PCs, pois, na Indústria 4.0, a tomada de decisão está cada vez mais descentralizada (Pagano et al., 2020). Os fabricantes então passaram a desenvolver sistemas de visão completos e embarcados que, além de capturar imagens, são capazes de extrair informações relevantes, gerar eventos baseados nas informações da imagem, tomar decisões e interagir com o meio através de periféricos, conexões de rede, CLPs (Controlador Lógico Programável), etc. (Araujo, 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a implementação do sistema *error proofing* foram avaliadas todas as etapas do método DMAIC em conjunto com o FMEA. Inicialmente, foi elaborado o *Project Charter* na etapa Definir do DMAIC. O *project charter* é uma ferramenta que resume o projeto, formalizando através de um documento o grupo de trabalho que compõe o projeto, o foco, objetivo e viabilidade dentro do cronograma (Vargas et al., 2020).

As informações da fase Definir foram incluídas na plataforma ardente (do inglês "*burning platform*") do projeto (Puri & Tadi, 2020). Essa ferramenta é utilizada como estratégia para mostrar o cenário/estado atual, definir prioridades e buscar suporte para o problema que se pretende resolver.

Após a coleta dos dados dos tipos de defeitos no ano de 2020, utilizou-se a análise de Pareto para identificar os defeitos mais frequentes e priorizar os mais críticos (Jamil et al., 2019). A regra de Pareto indica que 80% dos resultados se originam de 20% das causas (Tanabe, 2018).

Para o preenchimento da planilha do FMEA, verificaram-se os custos com reparo interno de defeitos na indústria e externo, identificados quando o produto já havia sido entregue para o cliente final.

Após a análise de Pareto, seguida do FMEA na etapa Analisar, foi definido que, dentro da linha de montagem da transmissão de veículos pesados – tipicamente, caminhões e tratores –, o sistema *error proofing* abordará o erro de montagem de discos de embreagem, por ter o maior RPN. Nessa montagem, os discos de embreagem devem ser intercalados, além de terem quantidades diferentes para cada modelo de veículo produzido.

Na etapa Melhorar, avaliou-se uma solução para garantir a correta montagem dos discos de embreagem dos veículos utilizando uma câmera inteligente (*Smart Camera*). Na solução proposta, utilizou-se uma câmera inteligente P-10 da empresa Datalogic e o *software* VPM *Impact Lite* da própria fabricante.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da implementação dos métodos DMAIC e FMEA no sistema *error proofing*.

4.1 Resultado da etapa DMAIC Definir

Na Fig. 2 é apresentado o *Project Charter* da etapa Definir do DMAIC. Na carta do projeto de planejamento são definidos o caso de estudo, o objetivo, o plano do projeto, a estimativa de redução de defeitos e custos, e a equipe de implementação.

Project Charter: Desenvolvimento de um sistema error proofing

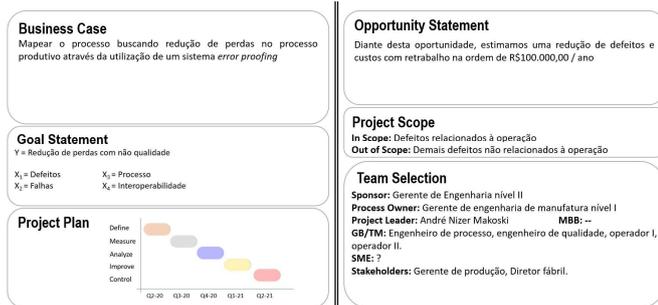


Fig. 2 *Project Charter* do desenvolvimento do sistema.

No ano de 2020 foram identificados 2792 defeitos na planta, sendo 1046 deles referentes à montagem. Na Tabela 1 são mostradas as informações de defeito na plataforma ardente, indicando as oportunidades que podem ser trabalhadas pela equipe. Pode-se notar que os dois principais índices de defeitos estão relacionados à montagem incorreta de itens e componentes soltos. Como exemplo, pode se citar peças internas de motores, transmissão e embreagem, entre outros. Nesses casos, o sistema de visão pode ser uma ferramenta útil na validação de montagens.

Tabela 1. Estratégia plataforma ardente para definição de prioridades

Informações de defeito de montagem no ano de 2020		
Componentes soltos	336	32%
Montagem incorreta	294	28%
Componentes faltando	144	14%
Componentes danificados	132	13%
*Demais defeitos	140	13%
Total de defeitos	1046	100%

*Os defeitos não relacionados à montagem, como erros de logística e fabricação, entre outros, foram excluídos.

4.2 Resultado da etapa DMAIC Medir

Na Fig. 3 é mostrado o Gráfico de Pareto com o percentual de defeitos encontrados durante a montagem de veículos. Como resultado, verifica-se que componentes soltos são os defeitos mais encontrados, seguido pela montagem incorreta.

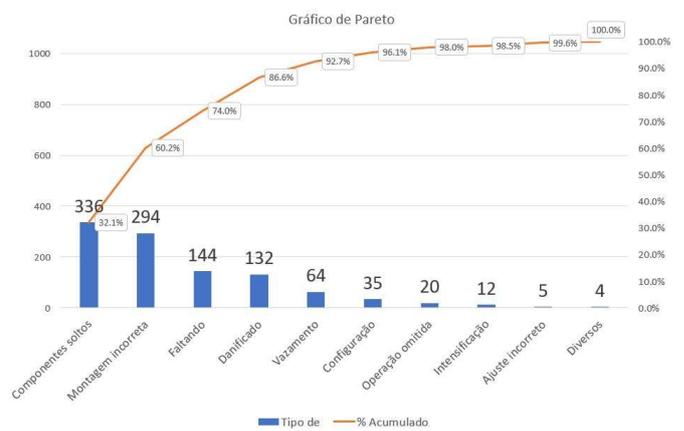


Fig. 3 Gráfico de Pareto dos erros de montagem.

Na Tabela 2 são mostrados os custos com reparo interno na indústria, incluindo: o valor da hora da remuneração do mecânico especialista, o total de horas gastas para retrabalho, o custo total dessas horas e o valor total das peças em que não foi possível realizar retrabalho e tiveram que ser substituídas.

Tabela 2. Custo com reparo interno

Ano de 2020	
Valor da hora (mecânico)	R\$ 16,00
Total de horas de retrabalho	3508
Custo com retrabalho	R\$ 56.128,00
Custo com peças danificadas	R\$ 64.640,00
Total	R\$ 120.768,00

Além dos custos com reparo interno, na Tabela 3 são apresentados o total de defeitos identificados quando o produto já havia sido entregue para o cliente final, a quantidade de defeitos relacionados com a montagem, o custo de retrabalho de todos os defeitos e o custo dos defeitos relacionados apenas com a montagem.

Tabela 3. Custo com reparo externo

Ano de 2020		
Total defeitos	35	100%
Defeitos relacionados à Montagem	6	17%
Custo com retrabalho total	R\$ 483.000,00	100%
Custo com retrabalho devido à montagem	R\$ 156.000,00	32%

Analisando os resultados das Tabelas 2 e 3, verifica-se que um sistema *error proofing* tem potencial para mitigar os defeitos relacionados à montagem, melhorando a qualidade do produto. Levando em consideração os resultados apresentados no ano de 2020, a adoção de um sistema *error proofing* na linha de montagem avaliada poderia economizar R\$ 276.768,00/ano com custos de não qualidade.

4.3 Resultado da etapa DMAIC Analisar

Apesar do defeito de componentes soltos ser o maior problema no período avaliado, neste artigo serão abordados os defeitos de montagem incorreta, dando continuidade ao tema explorado previamente pelos autores em outro artigo relacionado à comunicação com ferramentas de aperto utilizando o *Open Protocol* (Makoski et al., 2020).

Conforme a Tabela 4, a prioridade de cada defeito foi analisada e determinada utilizando o FMEA e, na sequência, um dos defeitos é abordado neste trabalho. Para aplicação da metodologia, escolheu-se a montagem da transmissão de um dos veículos produzidos pela empresa avaliada. Além disso, seguindo o passo a passo sugerido pela AIAG (2019), a equipe pontuou todas as falhas possíveis nesse processo de montagem. Foi possível identificar que o RPN inicial era de 360, sendo reduzido para 90 após a implementação da solução proposta capaz de evitar o erro de montagem.

Tabela 4. Planilha de FMEA preenchida

Processo	Função	Tipo de falha	Efeito da falha	S
Montar discos embreagem	Intercalar discos	Não intercalar	Degradação da função primária	9
Causa da Falha	Prevenção	O	Detecção	D
Sistema permite o erro	Não há	5	Inspecção visual	8
RPN inicial	360			
Ações				
Recomendadas	S	O	D	
Desenvolvimento de um dispositivo Poka-Yoke	9	5	2	
RPN final	90			

Na Tabela 4 os termos *S*, *O*, e *D* representam Severidade, Ocorrência e Detecção, respectivamente, e o RPN é calculado conforme a Eq. 1:

$$RPN = S \times O \times D. \quad (1)$$

Para maiores informações sobre a planilha do FMEA, consultar o capítulo 3 do AIAG (2019).

4.4 Resultado da etapa DMAIC Melhorar

Uma vez identificado os problemas a serem abordados, a fase melhorar consiste em implementar ações que venham solucionar esses problemas (Vargas et al., 2020). Neste trabalho é analisada uma solução para garantir a montagem dos discos de embreagem de diferentes veículos pesados utilizando uma câmera inteligente do tipo P-10.

4.5 Resultado da etapa DMAIC Controlar

A última fase do método DMAIC é Controlar. Nessa fase, verificam-se os resultados, mesmos que parciais, para validar se a meta foi ou será alcançada. Para isso, pode-se utilizar ferramentas estatísticas para tanto, como o Gráfico de Pareto, cartas de controle, indicadores de desempenho (KPI - *Key Performance Indicator*), entre outras (Werkema, 2012; Jamil et al., 2019; Vargas et al., 2020). O presente trabalho se encontra nessa etapa.

4.6 Solução Error proofing

Seguindo os conceitos de Jidoka, além da câmera para avaliação do sistema *error proofing* de montagem de discos de embreagem, é prudente que um sistema completo seja capaz de identificar o erro (através do sistema de visão), avisar o montador (sinais luminosos ou imagens), e, adicionalmente, não permitir que uma falha seja propagada. Para isso, fazer o intertravamento da montagem dos discos com o restante da montagem da transmissão é imprescindível.

A probabilidade de detecção pontuada na Tabela 4 indica que existe uma detecção pobre durante a montagem. Utilizando a câmera inteligente é possível criar na programação uma receita que identifique se a montagem está correta ou não, ou seja, identifica-se se a quantidade de discos está correta para o veículo montado e se os discos estão intercalados. Na Fig. 4 é mostrado o fluxograma do processo para essa operação.

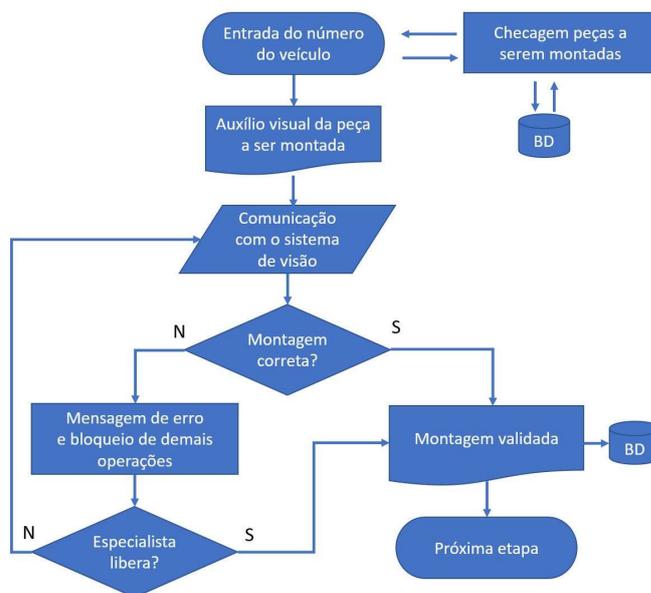


Fig. 4 Fluxograma do sistema *error proofing*.

Caso a câmera identifique uma montagem incorreta, o sistema *error proofing* sinaliza de forma visual o operador e bloqueia todas as outras operações desse veículo, realizando o intertravamento entre processos. O intertravamento inclui a comunicação com ferramentas de aperto, banco de dados (BDs), CLPs e outros equipamentos que venham a fazer parte da montagem da transmissão.

Na Fig. 5 e 6 é possível ver a tela do software VPM *Impact Lite* com a programação no qual é identificada a pontuação mínima e medida para classificação da montagem de 8 pares de discos intercalados.

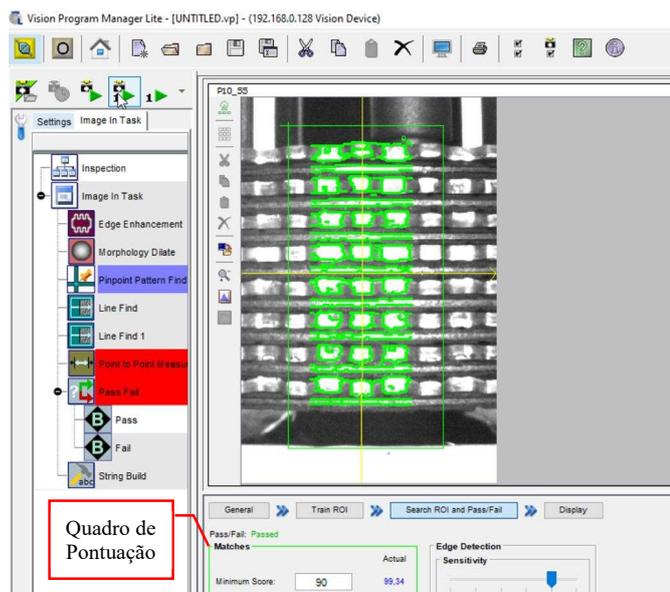


Fig. 5 Exemplo de montagem conforme detectada pelo sistema *error proofing* baseado em visão com pontuação de 99,34% (pontuação mínima de 90%).

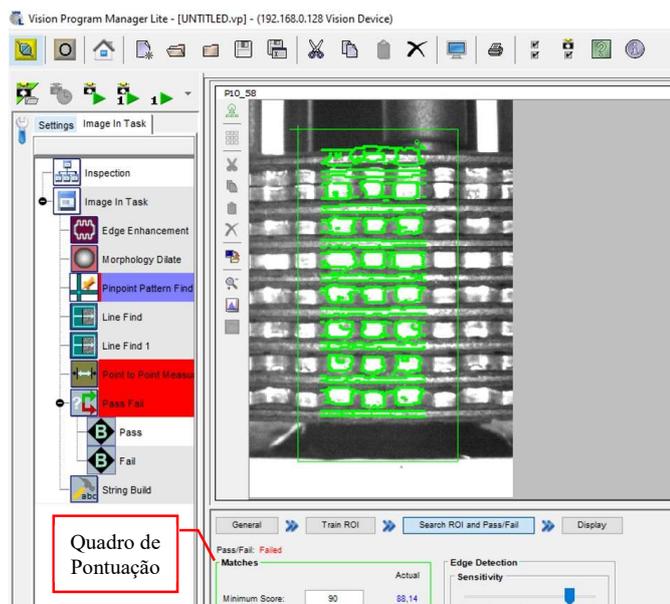


Fig. 6 Exemplo de montagem não conforme detectada pelo sistema *error proofing* baseado em visão com pontuação de 88,14% (pontuação mínima de 90%).

Algumas ferramentas do software, como, por exemplo, identificadores de contorno, são utilizadas para identificação dos discos. Após a configuração, o treinamento das imagens e os testes realizados, definiu-se um limiar de classificação mínimo de 90%, ou seja, qualquer montagem com valor inferior a esse limiar é considerada não conforme. Na Fig. 5 é indicada uma montagem classificada como correta (conforme), com pontuação de 99,34%, e na Fig. 6 uma montagem classificada como incorreta (não conforme), com pontuação de 88,14%.

A Fig. 7 mostra o dispositivo projetado para realizar a montagem dos discos e também acomodar a câmera que realiza a inspeção após a montagem. A iluminação forçada foi necessária para equalização e compensação de variações luminosas. Como resultado inicial, o sistema *error proofing* identificou 3 defeitos desde sua instalação até a data da última edição desse trabalho.



Fig. 7 Dispositivo projetado para acomodar a câmera e realizar a validação da montagem.

5. DISCUSSÕES

No sistema *error proofing* proposto a possibilidade de um conjunto de embreagens com defeito ser montado é muito menor que no método tradicional. O sistema se mostrou eficiente em atender totalmente as especificações de qualidade desejada, assim como o trabalho de Di Leo et al. (2017) que utilizou o sistema de visão para validação de montagem. Entretanto, a falha ainda pode ocorrer caso um especialista faça a liberação da montagem com erro através de uma justificativa que será armazenada para rastreabilidade futura. Futuramente, o alto nível de conectividade poderá ser explorado para permitir a comunicação com outros equipamentos responsáveis por inspeções ou montagens complementares, como, por exemplo, ferramentas de aperto, medidores inteligentes, equipamentos de abastecimento, equipamentos de testes, entre outros, provenientes da Indústria 4.0 (Makoski et al., 2020). Com isso, seria possível identificar diferentes falhas fazendo com que essas não se propaguem no processo produtivo, reduzindo ainda mais o custo com não qualidade. Além disso, é possível utilizar outras técnicas para realizar a validação de montagem utilizando arquiteturas de aprendizado profundo (*Deep Learning*) baseadas em redes

neurais convolucionais (*CNN - Convolutional Neural Network*) ou ainda *YOLO (You Only Lock Once)* (LeCun et al., 2015; Pathak et al., 2018; Castro & Pereira, 2020).

6. CONCLUSÕES

O presente estudo teve o objetivo de utilizar o método DMAIC e a ferramenta FMEA como estratégia de qualidade para desenvolver uma solução *error proofing* baseado em sistema de visão para montagem de discos de embreagem em veículos pesados. O sistema proposto se comunica com uma câmera inteligente que é responsável pela coleta e análise da imagem, sendo esta responsável pela decisão de conformidade ou não da montagem no processo produtivo, reduzindo o custo com não qualidade. Uma vez implementada a estratégia de qualidade no processo produtivo é necessário garantir a interoperabilidade entre sistemas, possibilitando o intertravamento entre processos e, assim, evitando que erros venham a se tornar defeitos. A solução apresentada está alinhada com as recentes estratégias modernas de qualidade, como o *Zero Defeito (Zero Defect Manufacturing)*, técnica em ascensão que vem sendo estimulada pelo crescimento da Indústria 4.0 (Psarommatis et al., 2019).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao gerente Edrey Damasio por fornecer suporte e recursos necessários, além das horas de trabalho para realização dos testes necessários.

REFERÊNCIAS

- Abhilash, C. & Thakkar, J. J., 2019. Application of Six Sigma DMAIC methodology to reduce the defects in a telecommunication cabinet door manufacturing process: A case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36(9), pp. 1540-1555.
- Adams, C., Gupta, P. & Wilson, C., 2003. *Six Sigma Deployment*. Elsevier Science.
- Aiag, 2019. *Análise de Modo e Efeitos de Falha - Manual FMEA*. s.l.:AIAG&VDA.
- Antony, J. & Banuelas, R., 2002. Critical success factors for the successful implementation of Six Sigma projects in organizations.. *The TQM Magazine*, 14(2), pp. 92-99.
- Antony, J., Snee, R. & Hoerl, R., 2016. *Lean Six Sigma: yesterday, today and tomorrow*. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 34(7), pp. 1073-1093.
- Araujo, B. G. F., 2019. *Sistema de Visão de Máquina para Detecção e Localização Automática de Peças Utilizando o Raspberry PI*, s.l.: s.n.
- Audenino, A., 2012. *Kaizen and Lean management autonomy and self-orientation, potentiality and reality*. Dans 2nd International Conference on Communications, Computing and Control Applications, pp. 1-6.
- Barrera, A. P. M. a. J., 2019. *Waste reduction using lean manufacturing tools: A case in the manufacturing of bricks*. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pp. 1285-1289.
- Belu, N., Lonescu, L. M., Misztal, A. & Mazãre, A., 2015. *Poka Yoke system based on image analysis and object recognition*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 95.
- Castro, L. B. & Pereira, F. G., 2020. *Inspecção de Componentes de Vagões Ferroviários Baseado em Visão Computacional e Aprendizagem Profunda*. *Congresso Brasileiro de Automática*, 2(1).
- Chao, L. P. & Ishii, K., 2007. *Design Process Error Proofing: Failure Modes and Effects Analysis of the Design Process*. *Journal of Mechanical Design*, 125(5).
- Deuse, J. et al., 2020. *Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0*. *International Journal of Engineering Business Management*, Volume 12, pp. 1-9.
- Di Leo, D., Liguori, C., Pietrosanto, A. & Sommella, P., 2017. *A vision system for the online quality monitoring of industrial manufacturing*. *OpticsandLasersinEngineering*, Volume 89, pp. 162-168.
- Feliciano, F. F., Souza, I. L. & Leta, F. R., 2005. *Visão computacional aplicada à metrologia dimensional automatizada..* 7(2), pp. 38-50.
- Garza-Reyes, J. A. et al., 2010. *An empirical application of Six Sigma and DMAIC methodology for business process improvement*. *Proceedings of the 20th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, 12(14), pp. 92-100.
- Huang, J., Jian-Xin, Y., Hu-Chen, L. & Song, M. S., 2020. *Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda*. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 199.
- Iwao, S., 2017. *Revisiting the existing notion of continuous improvement (Kaizen): literature review and field research of Toyota from a perspective of innovation*. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 14(1), pp. 29-59.
- Jamil, N. et al., 2019. *DMAIC-based approach to sustainable value stream mapping: towards a sustainable manufacturing system*. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, pp. 331-360.
- Jirassukprasert, P., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V. & Lim, M. K., 2014. *A Six Sigma and DMAIC application for the reduction of defects in a rubber gloves manufacturing process*. *JournalInternational Journal of Lean Six Sigma*, 5(1), pp. 2-21.
- Krishnan, B. R. & Prasath, K. A., 2013. *Six Sigma concept and DMAIC implementation*. *International Journal of Business, Management & Research*, 3(2), pp. 111-114.
- LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G., 2015. *Deep learning*. *Nature*, Volume 521, p. 436-444.
- Loureiro, R. G. et al., 2014. *Aplicação de ferramentas a prova de falha "Poka-Yoke" como ações resultantes de FMEA de processo em unidades produtivas do setor automobilístico*. *XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, pp. 1-32.
- Makoski, A. N., Silva, E. N. & Assef, A. A., 2020. *Controle remoto de ferramentas de aperto usando o Open Protocol*. *Congresso Brasileiro de Automática*.

- Nunes, F., Vaccaro, G. L. R. & Antunes Junior, J. A. ..., 2017. The development of the Hyundai Production System: The historical evolution. *Journal of Manufacturing Systems*, 43(1), pp. 47-57.
- Pagano, S., Russo, R. & Savino, S., 2020. A vision guided robotic system for flexible gluing process in the footwear industry. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Volume 65.
- Pande, P., Neuman, R. P. & Cavanagh, R. R., 2000. *The Six Sigma Way*. New York: s.n.
- Pathak, A. R., Pandey, M. & Rautaray, S., 2018. Application of Deep Learning for Object Detection. *Procedia computer science*, Volume 132, pp. 1706-1717.
- Pillai, A. K. R., Pudir, A. K. & Ganapathy, L., 2012. Implementing integrated lean Six Sigma for software development: A flexibility framework for managing the continuity: change dichotomy. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 13(2), pp. 107-116.
- Psarommatis, F., May, G., Dreyfus, P. & Kiritsis, D., 2019. Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research. *Int J Prod Res*, pp. 1-17.
- Psychogios, A. & Tsironis, L., 2012. Towards an integrated framework for Lean Six Sigma application: lessons from the airline industry. Volume 23, pp. 397-415.
- Puri, I. & Tadi, P., 2020. *Quality Improvement*. StatPearls Publishin..
- Raval, S. J. & Kant, J., 2017. Study on Lean Six Sigma frameworks: a critical literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 8(3), pp. 275-334.
- Rocha, T. F. C. L., 2016. *Estudo de caso das práticas de melhoria contínua de manufatura enxuta e Seis Sigma em uma unidade multinacional no Brasil*, São Paulo: s.n.
- Romero, D. et al., 2019. Rethinking Jidoka Systems under Automation & Learning Perspectives in the Digital Lean Manufacturing World. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), pp. 899-903.
- Salah, S., Rahim, A. & Carretero, J. A., 2010. The integration of six sigma and lean management.. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(3), pp. 249-274.
- Semeniuta, O., Dransfeld, S., Martinsen, K. & Falkman, P., 2018. Towards increased intelligence and automatic improvement in industrial vision systems. *Procedia CIRP*, Volume 67, pp. 256-261.
- Semeniuta, O., Sebastian, D. & Martinsen, K. F. P., 2018. Towards increased intelligence and automatic improvement in industrial vision systems. *11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, pp. 256-261.
- Shingo, S., 1996. *O sistema Toyota de produção do ponto de vista da engenharia de produção*. Porto Alegre: s.n.
- Smętkowska, M. & Mrugalska, B., 2018. Using Six Sigma DMAIC to improve the quality of the production process: a case study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Volume 238, pp. 590-596.
- Tanabe, K., 2018. Pareto's 80/20 rule and the Gaussian distribution. *tatistical Mechanics and its Applications*, Volume 510, pp. 635-640.
- Toyota, 2021. *Sistema Toyota de Produção*. [Online] Available at: <https://www.toyota.com.br/mundo-toyota/toyota-production-system/> [Accessed 16 03 2021].
- Turetskyy, A., Wessel, J., Hermmann, C. & Thied, S., 2020. Data-driven cyber-physical System for Quality Gates in Lithium-ion Battery Cell Manufacturing. *Procedia CIRP*, Volume 93, pp. 168-173.
- Vaishnavi, V. & Suresh, M., 2020. Modelling of readiness factors of the implementation of Lean Six Sigma in healthcare organizations.. *International Journal of Lean Six Sigma*.
- Vargas, A. P. et al., 2020. Towards Industry Improvement in Manufacturing with DMAIC. *Springer International Publishing*, pp. 541-352.
- Werkema, M. C. C., 2012. *Criando a cultura Lean Seis Sigma*. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Womak, J. P., Jones, D. T. & Roos, D., 1990. *The machine that changed the world*. New York: HapperCollins: s.n.
- Yadav, G. & Desai, T. N., 2016. Lean Six Sigma: a categorized review of the literature. *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(1), pp. 2-24.