

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALYSSON BERNARDI FILHO  
MELISSA MILLEO COELHO**

**MODELO TEÓRICO DE OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA QUALIDADE POR MEIO  
DE ANÁLISE DE DADOS INDUSTRIAIS SIMULADOS**

**PONTA GROSSA  
2025**

versão 11.0 (abr.25)

**ALYSSON BERNARDI FILHO**  
**MELISSA MILLEO COELHO**

**MODELO TEÓRICO DE OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA QUALIDADE POR MEIO  
DE ANÁLISE DE DADOS INDUSTRIAIS SIMULADOS**

**THEORETICAL MODEL FOR OPTIMIZING QUALITY MANAGEMENT THROUGH  
ANALYSIS OF SIMULATED INDUSTRIAL DATA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Thiago Peixoto de Araujo.  
Coorientadora: Ana Maria Bueno.

**PONTA GROSSA**

**2025**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ALYSSON BERNARDI FILHO**  
**MELISSA MILLEO COELHO**

**MODELO TEÓRICO DE OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA QUALIDADE POR MEIO  
DE ANÁLISE DE DADOS INDUSTRIAIS SIMULADOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Química da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 08/dezembro/2025

---

Thiago Peixoto de Araújo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

---

Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

---

Jean Cesar Marinozi Vicentini  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

**PONTA GROSSA**  
**2025**

Dedicamos este trabalho à nossa família, amigos e professores, que de alguma maneira participaram de nossa formação acadêmica e contribuíram para o crescimento pessoal e profissional nesses anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradecemos a Deus por nos conceder força, inteligência e resiliência para chegarmos até o presente momento, sem Suas graças e bênçãos, não seria possível ter uma jornada tão gratificante e alegre.

Hoje, podemos olhar para todas as barreiras e desafios com o coração cheio de gratidão e o sentimento de dever cumprido.

“O Senhor é a minha força e o meu escudo; nele o meu coração confia, e dele recebo ajuda.” (Salmos 28:7)

Aos nossos familiares, que sempre nos apoiaram em cada etapa desse caminho, oferecendo amor, incentivo e compreensão nos momentos difíceis.

Obrigado por acreditarem em nós e por serem nosso porto seguro.

Aos amigos que estiveram ao nosso lado, compartilhando risadas, conselhos e apoio nos momentos em que pensamos em desistir. A amizade e o companheirismo de vocês tornaram nossa trajetória mais leve e especial.

Aos professores e orientadores, que nos guiaram com paciência, dedicação e conhecimento, contribuindo para o nosso crescimento não apenas acadêmico, mas também pessoal e profissional.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, nosso mais sincero agradecimento.

Que este seja apenas o começo de uma jornada repleta de sucesso e aprendizado.

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece.” (Filipenses 4:13)

"Mas os que esperam no Senhor  
renovarão as suas forças. Voarão alto  
como águias; correrão e não ficarão  
exaustos, andarão e não se cansarão."  
(Isaías 40:31).

## RESUMO

A gestão da qualidade em ambientes industriais ainda depende de registros manuais, um método que, embora tradicional, apresenta limitações estruturais relevantes. O uso de formulários em papel na contagem de peças, classificação de não conformidades e comunicação entre produção e qualidade gera erros de preenchimento, rasuras, ilegibilidade, divergências entre operadores, atrasos informacionais e perda de dados, comprometendo a rastreabilidade e reduzindo a confiabilidade das informações utilizadas para a tomada de decisão. Essas fragilidades afetam diretamente o monitoramento dos indicadores de desempenho e dificultam a padronização operacional, reforçando a necessidade de soluções digitais que garantam maior agilidade e precisão no fluxo de dados. Diante desse cenário, este trabalho desenvolveu e avaliou um modelo teórico de otimização da gestão da qualidade baseado na digitalização e integração de dados industriais, simulando sua aplicação em um processo de registro de produção. A metodologia envolveu a análise das limitações do sistema manual, a construção de um modelo digital automatizado e a comparação entre ambos por meio de indicadores de desempenho e ferramentas da qualidade como PDCA, Ishikawa, Pareto e 5 Porquês. Os resultados simulados demonstraram reduções superiores a 85% nos erros de registro, nos atrasos de comunicação e no retrabalho, além de ampliar significativamente a precisão, a padronização e a rastreabilidade das informações. A análise das causas evidenciou que os problemas estruturais do método manual estão diretamente relacionados à ausência de padronização, à dependência da interpretação individual e à falta de integração eletrônica. Com isso, conclui-se que o modelo digital proposto representa uma solução eficaz para mitigar falhas operacionais, acelerar o fluxo de informação e fortalecer a tomada de decisão baseada em dados, alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0. O estudo demonstra que a integração e digitalização dos dados industriais constituem etapas essenciais para tornar os processos produtivos mais confiáveis, eficientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Digitalização industrial; integração de dados; otimização de processos; gestão da qualidade; rastreabilidade; Indústria 4.0.

## ABSTRACT

Quality management in industrial environments still relies on manual records, a traditional method that presents significant structural limitations. The use of paper forms for part counting, nonconformity registration, and communication between production and quality leads to transcription errors, illegible records, operator variability, information delays, and data loss, compromising traceability and reducing the reliability of information used for decision-making. These shortcomings directly affect the monitoring of performance indicators and hinder operational standardization, emphasizing the need for digital solutions capable of ensuring greater agility and accuracy in data flow. In response to this scenario, this study develops and evaluates a theoretical model for optimizing quality management through the digitalization and integration of industrial data, simulating its application within a production recording process. The methodology involved analyzing the limitations of the manual system, developing an automated digital model, and comparing both approaches using performance indicators and quality tools such as PDCA, Ishikawa, Pareto, and 5 Whys. The simulated results showed reductions above 85% in registration errors, communication delays, and rework, while significantly increasing accuracy, standardization, and traceability. The root-cause analysis demonstrated that the structural issues of the manual method are directly related to the lack of standardization, dependence on individual interpretation, and absence of electronic integration. Therefore, the proposed digital model is concluded to be an effective solution for mitigating operational failures, accelerating information flow, and reinforcing data-driven decision-making, in alignment with Industry 4.0 principles. The study demonstrates that the digitalization and integration of industrial data are essential steps toward making production processes more reliable, efficient, and sustainable.

**Keywords:** Industrial digitalization; data integration; process optimization; quality management; traceability; Industry 4.0.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Evolução das eras da Qualidade .....                                | 14 |
| Figura 2 - Fundamentos da gestão da qualidade total (TQM) .....                | 15 |
| Figura 3 - Ciclo de análise de dados .....                                     | 16 |
| Figura 4 - Exemplo ciclo PDCA .....  | 18 |
| Figura 5 – Exemplo gráfico de Pareto .....                                     | 20 |
| Figura 6 - Exemplo de diagrama de Ishikawa .....                               | 22 |
| Figura 7: Exemplo de aplicação da técnica dos 5 porquês .....                  | 24 |
| Figura 8 - Pilares da Indústria 4.0 .....                                      | 25 |
| Figura 9 - Painel Principal.....   | 34 |
| Figura 10 - Log_Produção .....   | 34 |
| Figura 11 - Cadastro de defeitos .....   | 34 |
| Figura 12 - Etiquetas aprovadas .....  | 35 |
| Figura 13 - Etiquetas reprovadas .....   | 35 |
| Figura 14 - Rotina de inicialização e registro no código VBA .....             | 39 |
| Figura 15 - Rotina de registro de peças no código VBA.....                     | 39 |
| Figura 16 - Rotina de emissão e consolidação de etiquetas no código VBA ...    | 40 |
| Figura 17 - Parte final da rotina de impressão de etiquetas no código VBA .... | 40 |
| Figura 18 - Gráfico de Pareto das falhas no registro manual.....               | 47 |
| Figura 19 - Diagrama de Ishikawa das causas de falhas no registro manual ...   | 48 |
| Figura 20 - Comparativo gráfico entre sistema manual e digital (simulação)...  | 51 |

## LISTA DE QUADROS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Quadro 1 - Abas do sistema digital .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>Quadro 2- Comparação entre sistema manual e sistema digital (simulação)...</b>               | <b>41</b> |
| <b>Quadro 3 - Dados simulados de produção por lote .....</b>                                    | <b>43</b> |
| <b>Quadro 4 - Dados simulados do processo manual .....</b>                                      | <b>44</b> |
| <b>Quadro 5 - Correlação Operador × Defeitos .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>Quadro 6 - Defeitos simulados com base em proporções comuns na literatura .....</b>          | <b>46</b> |
| <b>Quadro 7 - Aplicação dos 5 Porquês .....</b>   | <b>49</b> |
| <b>Quadro 8 - Comparação entre sistema manual e sistema digital (simulação)..</b>               | <b>50</b> |
| <b>Quadro 9 - Comparativo de indicadores de desempenho antes e depois da digitalização.....</b> | <b>51</b> |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>12</b> |
| 1.1      | Objetivo Geral .....  | 13        |
| 1.2      | Objetivos Específicos .....   | 13        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>14</b> |
| 2.1      | Da Qualidade Clássica à Qualidade .....                                   | 14        |
| 2.2      | Ciclo PDCA .....  | 17        |
| 2.3      | Gráfico de Pareto.....  | 19        |
| 2.4      | Diagrama de Ishikawa .....  | 21        |
| 2.5      | Técnica dos 5 Porquês .....   | 23        |
| 2.6      | Indústria 4.0 .....   | 25        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....  | <b>28</b> |
| 3.1      | Tipo e abordagem da pesquisa .....  | 28        |
| 3.2      | Coleta e Simulação de Dados (Plan).....                                   | 29        |
| 3.3      | Desenvolvimento do Sistema Digital Automatizado (Do) .....                | 30        |
| 3.4      | Procedimentos de Análise e Verificação (Check).....                       | 31        |
| 3.5      | Estrutura Metodológica Baseada no Ciclo PDCA.....                         | 32        |
| 3.5.1    | PLAN – Diagnóstico Inicial e Definição do Problema .....                  | 33        |
| 3.5.2    | DO – Desenvolvimento do Modelo Digital .....                              | 33        |
| 3.5.3    | CHECK – Análise do Modelo e Verificação Teórica .....                     | 35        |
| 3.5.4    | ACT – Padronização Teórica e Propostas de Melhoria .....                  | 36        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                      | <b>37</b> |
| 4.1      | Visão Geral dos Cenários Avaliados .....                                  | 37        |
| 4.2      | Desenvolvimento do Sistema Digital Automatizado .....                     | 37        |
| 4.3      | Análise e Verificação dos Resultados (Check) .....                        | 41        |
| 4.4      | Integração das Ferramentas da Qualidade à Análise.....                    | 42        |
| 4.5      | Dados Simulados e Cenário Analisado .....                                 | 43        |
| 4.6      | Análise por Diagrama de Pareto .....                                      | 46        |
| 4.7      | Diagrama de Ishikawa .....  | 47        |
| 4.8      | Análise dos 5 Porquês – Identificação da Causa Raiz .....                 | 48        |
| 4.9      | Comparação entre o Sistema Manual e o Sistema Digital (Simulado)<br>..... | 49        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | <b>53</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>55</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A competitividade da indústria moderna exige que os processos produtivos sejam continuamente aprimorados, com foco na redução de falhas, na otimização de recursos e na garantia da qualidade do produto final. Nesse contexto, a gestão da qualidade assume um papel estratégico ao integrar o controle de processos à análise de dados e à tomada de decisão, especialmente em um cenário no qual a Indústria 4.0 promove a convergência entre sistemas físicos e digitais, possibilitando a utilização de dados em tempo real para prever falhas e otimizar processos produtivos (Kagermann et al., 2013; Kumar et al., 2022).

Esse ambiente digital incorpora tecnologias como Internet das Coisas, big data e computação em nuvem, que permitem coletar, transferir e analisar grandes volumes de dados ao longo do processo produtivo, tornando as operações mais eficientes, econômicas e sustentáveis. Na Engenharia Química, essa integração é particularmente relevante em operações envolvendo reatores químicos, nos quais variáveis como temperatura, pressão, tempo de residência e conversão precisam ser monitoradas de forma contínua para garantir segurança, qualidade do produto e eficiência do processo (Fogler, 2016).

Apesar desses avanços tecnológicos, muitas empresas ainda mantêm práticas manuais no controle da produção e da qualidade, como o uso de formulários em papel para a contagem de peças, registro de desvios e apontamento de defeitos. Esses procedimentos estão sujeitos a erros de preenchimento, perdas de documentos e falhas de comunicação entre setores, além de demandarem tempo adicional para posterior digitação em planilhas digitais, o que compromete a rastreabilidade e retarda o fluxo de informações críticas (Makhmudah et al., 2025).

Além disso, a ausência de padronização e de integração eletrônica torna os registros manuais mais suscetíveis a rasuras e erros de transcrição, exigindo esforço adicional para consolidar dados que, muitas vezes, se apresentam ilegíveis ou incompletos. Essa limitação também afeta processos típicos da Engenharia Química, nos quais a falta de dados confiáveis pode comprometer o controle operacional de sistemas reacionais e dificultar a identificação de desvios de processo (Fogler, 2016; Makhmudah et al., 2025).

Diante desse cenário, a utilização de plataformas integradas baseadas em análise de dados surge como alternativa para superar tais limitações, uma vez que permite conectar produção, qualidade e manutenção, proporcionando visibilidade em tempo real e possibilitando a identificação de padrões e interações que seriam imperceptíveis em sistemas isolados (Filz et al., 2024). Com esse propósito, a presente pesquisa propõe um modelo teórico de otimização da gestão da qualidade por meio da análise e integração de dados industriais, promovendo a transição de um ambiente baseado em registros manuais para um sistema digital automatizado.

### **1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um modelo teórico de otimização da gestão da qualidade baseado na análise e integração de dados industriais simulados.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- I. Analisar as principais falhas do sistema manual de registro e comunicação entre produção e qualidade;
- II. Simular a implementação de um sistema digital automatizado e integrado;
- III. Aplicar ferramentas da qualidade (Ishikawa, 5 Porquês, PDCA e Gráfico de Pareto) para identificar causas e propor melhorias;
- IV. Comparar os resultados antes e depois da digitalização, considerando tempo de preenchimento, índice de erro e eficiência da comunicação;
- V. Demonstrar, teoricamente, como a digitalização dos dados industriais pode aumentar a confiabilidade e a rastreabilidade no processo produtivo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Da Qualidade Clássica à Qualidade

A gestão da qualidade tem se consolidado como um dos principais pilares da competitividade industrial, promovendo a padronização, a melhoria contínua e a satisfação do cliente. Embora sua consolidação metodológica tenha ocorrido principalmente a partir do século XX, diferentes abordagens foram sendo estruturadas ao longo do tempo com foco crescente na prevenção de falhas, melhoria de processos e satisfação do cliente. Entre os principais pensadores responsáveis por essa sistematização destacam-se Walter A. Shewhart, W. Edwards Deming, Joseph M. Juran, Philip Crosby, Kaoru Ishikawa e Armand Feigenbaum, considerados os “gurus da qualidade”.

Diversas correntes teóricas e práticas deram origem a modelos que evoluíram desde a simples inspeção do produto até sistemas voltados à gestão integrada e participação das pessoas na melhoria contínua. Essa evolução pode ser visualizada na Figura 1, que apresenta as quatro eras da qualidade e os respectivos conceitos e eixos predominantes em cada fase.

**Figura 1 - Evolução das eras da Qualidade**



Fonte: Moura (2023)

Segundo Deming (1986), a qualidade é um processo de aprendizado contínuo, baseado em medições e na busca pela estabilidade dos processos. Juran (1991) complementa essa visão ao afirmar que a qualidade deve ser planejada e controlada de forma sistemática, garantindo que o produto final atenda às expectativas

do cliente. Para Crosby (1979), a qualidade significa “conformidade com os requisitos”, ou seja, fazer certo da primeira vez. Ishikawa (1986) destaca a importância da participação de todos os colaboradores na busca pela melhoria contínua, e Feigenbaum (1991) defende a Qualidade Total como uma responsabilidade de toda a organização, e não apenas de um setor isolado.

Com base nesses fundamentos, a Gestão da Qualidade Total (TQM – Total Quality Management) evoluiu nas décadas de 1970 e 1980, integrando-se às estratégias corporativas e priorizando a prevenção de falhas, a padronização de processos e o uso de indicadores de desempenho. A Figura 2 ilustra essa abordagem ampliada, destacando seus princípios e a atuação sistêmica sobre processos.

**Figura 2 - Fundamentos da gestão da qualidade total (TQM)**



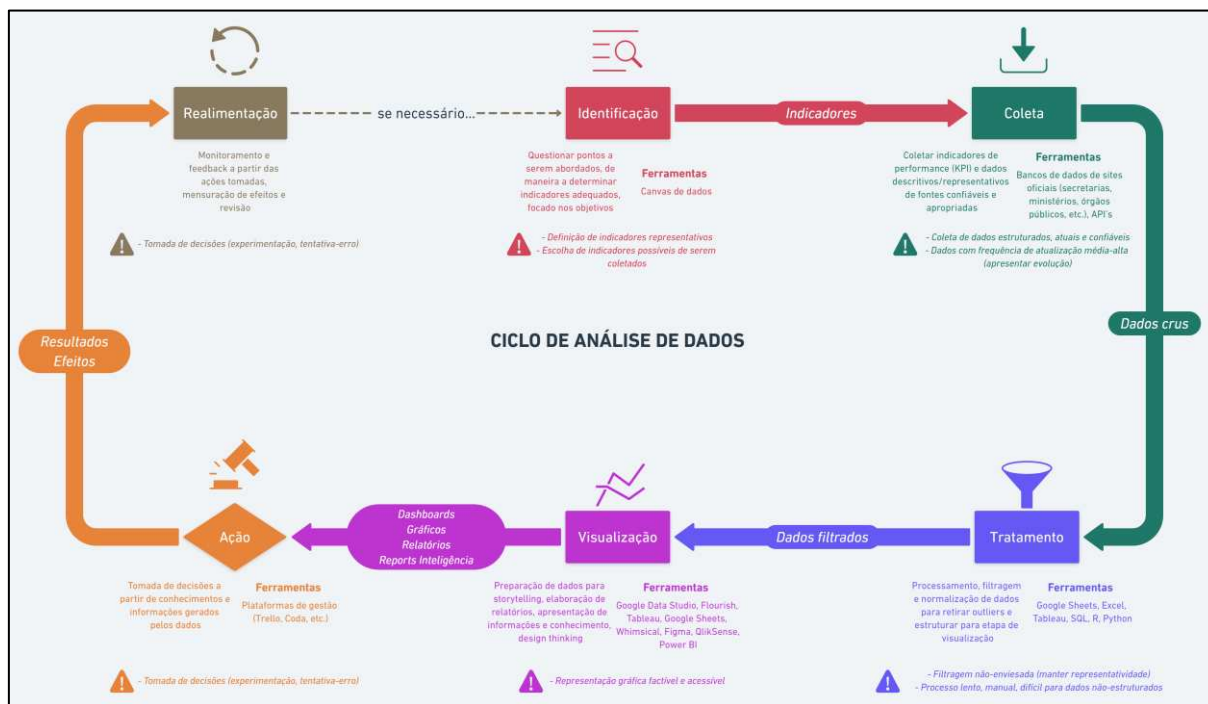
**Fonte: Punyod (2025)**

Para operacionalizar a gestão da qualidade, diversas ferramentas foram desenvolvidas e aplicadas nas indústrias com o objetivo de analisar causas, priorizar problemas e orientar a tomada de decisões. Entre as mais utilizadas, destacam-se o Diagrama de Ishikawa, o Ciclo PDCA, o método dos 5 Porquês e o Gráfico de Pareto, amplamente adotados em ambientes industriais para orientar ações estruturadas de melhoria contínua.

Com a adoção crescente de sistemas digitais, essas ferramentas passaram a ser aplicadas em plataformas eletrônicas que centralizam dados, padronizam registros e facilitam a visualização dos resultados. Estudos mostram que a digitalização dos processos melhora a consistência e a rastreabilidade das informações, reduz o tempo de registro manual e aumenta a confiabilidade na tomada de decisão (Filz et al., 2024;

Glowalla, 2014). A Figura 3 ilustra o ciclo de análise de dados, destacando as etapas fundamentais para transformar dados brutos em informações confiáveis para a gestão da qualidade.

**Figura 3 - Ciclo de análise de dados**



Fonte: Simas (2022).

A confiabilidade dos dados é um elemento fundamental para a gestão da qualidade, uma vez que decisões assertivas dependem de medições precisas, controle sistemático e padronização das informações (Falconi, 2014). A literatura demonstra que falhas de registro, ausência de padronização e duplicidade de apontamentos podem comprometer indicadores e dificultar o monitoramento do desempenho (Fu et al., 2024).

Nesse contexto, o uso integrado de ferramentas da qualidade em ambientes digitais torna mais eficiente a identificação de desvios, priorização de causas e acompanhamento dos resultados, contribuindo para uma atuação mais estruturada e orientada por evidências (Huang et al., 2022). Assim, a modernização dos processos de qualidade não se limita ao uso das ferramentas em si, mas à forma como os dados são organizados, armazenados e analisados, promovendo maior agilidade, transparência e padronização.

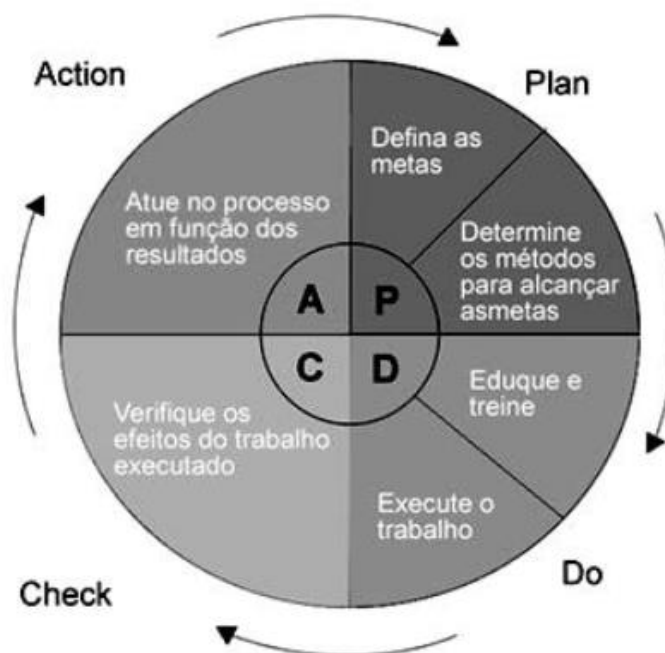
## 2.2 Ciclo PDCA

O ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act) permanece como uma das principais estruturas de gestão da qualidade, mesmo diante das transformações tecnológicas da Indústria 4.0. Trata-se de um método cíclico que orienta o planejamento, a execução, a verificação e a padronização de ações, garantindo que a melhoria ocorra de forma contínua e baseada em dados concretos.

Segundo Deming (1986), o PDCA constitui uma filosofia de gestão orientada ao aprendizado organizacional, na qual a tomada de decisão deve estar fundamentada em evidências. Em linha semelhante, Falconi reforça que “a ação só é eficaz se for embasada em dados e acompanhada de perto” (Campos, 2009), destacando que o ciclo deve ser internalizado como mentalidade e não apenas aplicado como ferramenta.

Concebido originalmente por Walter Shewhart e posteriormente difundido por Deming, o PDCA evoluiu de um instrumento de controle estatístico para um modelo abrangente de gestão voltado ao aperfeiçoamento contínuo. A literatura contemporânea destaca sua relevância na padronização e na redução de variabilidade dos processos, inclusive em sistemas produtivos automatizados (Peças et al., 2021; Wolniak & Tomecki, 2024). A Figura 4 apresenta uma representação do ciclo PDCA, destacando suas quatro etapas fundamentais e sua aplicação como estrutura de apoio à melhoria contínua dos processos.

Figura 4 - Exemplo ciclo PDCA



Fonte: Campos (2008)

Falconi (2014) reforça que o ciclo PDCA é ininterrupto e cumulativo, uma vez que cada iteração gera aprendizados que alimentam novos ciclos, permitindo níveis progressivos de aprimoramento. Nesse contexto, o PDCA organiza-se em quatro etapas principais. Na fase Plan, identificam-se problemas, estabelecem-se metas e planejam-se ações, etapa considerada crítica por fundamentar todo o ciclo e exigir análise detalhada das causas e envolvimento das áreas impactadas (Andrade, 2003).

A etapa Do corresponde à implementação das ações planejadas, com monitoramento estruturado e coleta de dados que subsidiarão a verificação (Rother, 2010). Essa fase depende de planejamento prévio adequado, disponibilidade de recursos e alinhamento dos envolvidos.

Na etapa Check, os resultados são comparados às metas e indicadores estabelecidos, permitindo validar ganhos, identificar desvios e reconhecer oportunidades de melhoria com base em dados formalizados (Prashar, 2017).

Por fim, a etapa Act consolida as melhorias obtidas, padronizando práticas eficazes, disseminando-as na organização e reiniciando o ciclo em um novo nível de maturidade (Falconi, 2014; Rother, 2010).

Com a digitalização industrial, o PDCA ganha nova dimensão estratégica ao integrar tecnologias como IoT, sistemas MES, Big Data, sensores inteligentes e coleta automática de dados, que reduzem falhas manuais e ampliam a precisão das informações utilizadas na tomada de decisão (Dutta et al., 2021; Fadilasari, 2024).

Painéis analíticos e algoritmos preditivos fortalecem especialmente a etapa de verificação, permitindo monitoramento em tempo real, antecipação de falhas e análises estatísticas mais rigorosas (Peças et al., 2021; Hafid, 2025).

Da mesma forma, plataformas digitais aplicadas à etapa de ação facilitam a padronização, o registro de procedimentos e a atualização contínua de instruções de trabalho, ampliando a disseminação do conhecimento organizacional (Fadilasari, 2024).

Além de favorecer decisões mais precisas, o PDCA digitalizado promove integração entre áreas, atuando como eixo estruturador do fluxo de informações entre produção, qualidade, engenharia e manutenção. A centralização de dados permite decisões colaborativas e redução de fragmentação operacional (Dutta et al., 2021; Hafid, 2025), fortalecendo a coordenação intersetorial e a rastreabilidade dos processos.

Nesse cenário, o PDCA atua como ponte metodológica entre modelos tradicionais de gestão da qualidade e abordagens orientadas a dados, mantendo-se como pilar central da melhoria contínua. Sua integração a tecnologias emergentes potencializa a transformação de dados em conhecimento e sustenta práticas gerenciais mais precisas, rastreáveis e responsivas às demandas da Indústria 4.0 (Wolniak & Tomecki, 2024; Peças et al., 2021; Dutta et al., 2021).

Neste estudo, o ciclo PDCA foi utilizado como diretriz metodológica, orientando a organização das etapas de desenvolvimento, desde o planejamento até a avaliação dos resultados obtidos.

### **2.3 Gráfico de Pareto**

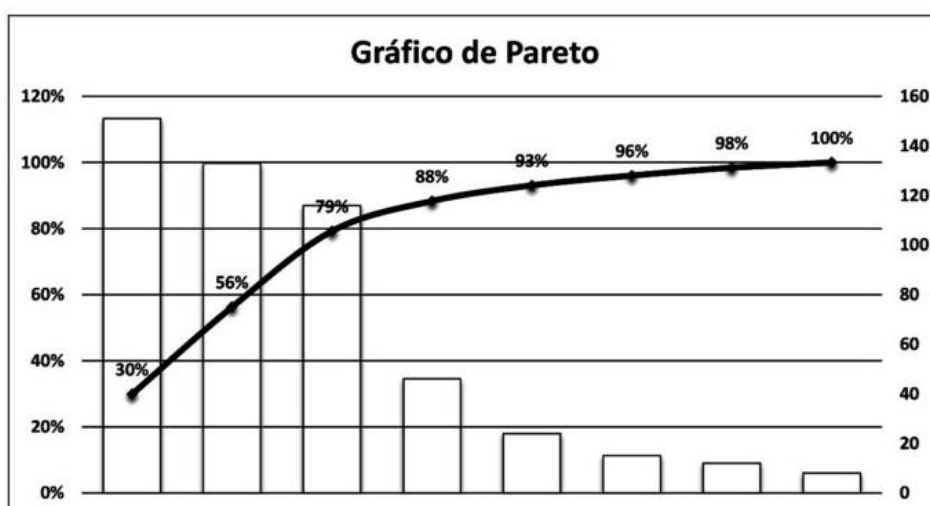
O Gráfico de Pareto é uma das ferramentas mais consagradas da gestão da qualidade e desempenha papel central na priorização de problemas dentro dos processos industriais. Baseado no princípio formulado por Vilfredo Pareto e interpretado por Juran no contexto da qualidade, o método propõe que uma pequena quantidade de causas é responsável pela maior parte dos efeitos observados,

conceito amplamente reconhecido como o princípio 80/20 (Juran, 1992; Werkema, 2014).

Segundo Juran (1992), a principal função dessa ferramenta é distinguir entre os “poucos vitais” e os “muitos triviais”, permitindo que os esforços de melhoria sejam direcionados de forma estratégica para os pontos de maior impacto. O Pareto organiza visualmente os dados em ordem decrescente de ocorrência, o que facilita a identificação dos principais tipos de falhas e das categorias que demandam atenção imediata.

A construção do Gráfico de Pareto envolve etapas sequenciais que organizam os dados de forma estruturada. Inicialmente, ocorre a coleta e categorização das ocorrências, agrupando-as em tipos, causas ou classes de falhas. Em seguida, as frequências são contabilizadas e organizadas em ordem decrescente, possibilitando identificar quais categorias apresentam maior impacto. Após essa ordenação, calcula-se o percentual individual de cada categoria e seu percentual acumulado, o que permite a representação gráfica por meio de barras e uma curva acumulativa, facilitando a visualização das causas mais significativas (Werkema, 2014; Dhamangaonkar, 2020). A Figura 5 apresenta um exemplo de Gráfico de Pareto, utilizado para priorização das causas mais significativas.

**Figura 5 – Exemplo gráfico de Pareto**



Fonte: Terzoni (2018)

Slack, Chambers e Johnston (2015) ressaltam que uma das grandes vantagens do Pareto é a clareza visual: suas barras e curva acumulada permitem que gestores e equipes reconheçam rapidamente quais fatores representam maior

contribuição para as não conformidades registradas. Essa visualização objetiva auxilia discussões baseadas em fatos, reduz subjetividades e fortalece a tomada de decisão.

Para Basu (2020), o Pareto não se limita à representação estatística; ele também opera como uma ferramenta de suporte argumentativo, justificando decisões técnicas e priorizando iniciativas de melhoria. Outro aspecto relevante é sua integração com métodos complementares, como o Diagrama de Ishikawa, que aprofunda a investigação das causas mais críticas destacadas no gráfico (Dhamangaonkar, 2020). Essa combinação possibilita uma abordagem estruturada e completa da análise: enquanto o Pareto identifica o que deve ser priorizado, o Ishikawa explica por que esses problemas ocorrem.

Além disso, o Gráfico de Pareto possui ampla aceitação em contextos produtivos pela sua simplicidade de aplicação, custo baixo e facilidade de comunicação. Por ser de interpretação intuitiva, a ferramenta favorece a participação de equipes multidisciplinares e facilita apresentações gerenciais, reuniões de acompanhamento e relatórios técnicos (Werkema, 2014).

No contexto deste trabalho, o Pareto será utilizado como ferramenta para analisar os dados simulados, permitindo identificar quais tipos de defeitos representam maior proporção das não conformidades. Assim, a utilização do gráfico contribui para uma análise estruturada e alinhada às metodologias clássicas da gestão da qualidade, fundamentando interpretações e tomada de decisão baseada em evidências.

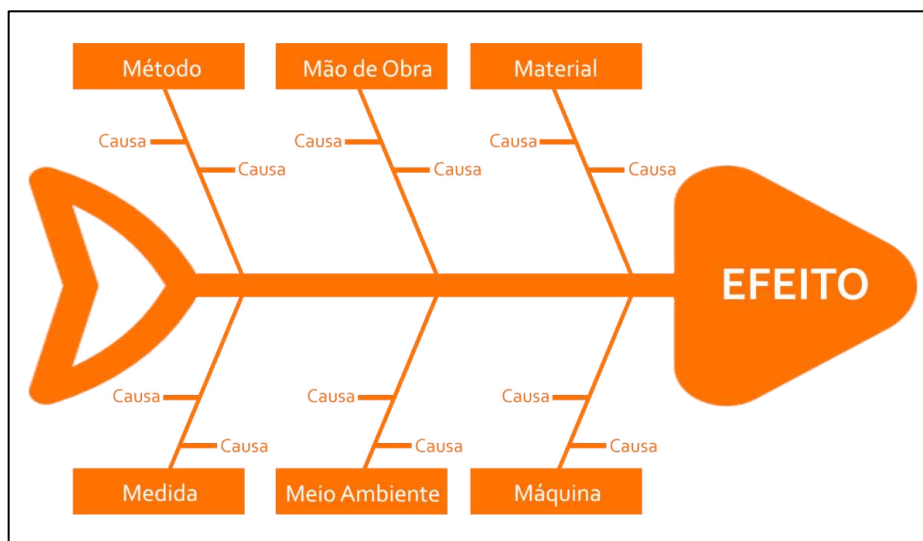
## **2.4 Diagrama de Ishikawa**

O Diagrama de Causa e Efeito, também chamado de Diagrama de Ishikawa ou “espinha de peixe”, foi desenvolvido por Kaoru Ishikawa na década de 1940 com o objetivo de estruturar visualmente as causas potenciais de um problema. A literatura especializada destaca que essa ferramenta organiza os fatores que influenciam um desvio em categorias principais e subcausas, permitindo uma análise lógica e estruturada do fenômeno estudado (Tagaram & Chen, 2024; Vera et al., 2020).

A estrutura clássica agrupa as causas nos chamados 6M: método, máquina, material, mão de obra, meio ambiente e medição, o que facilita a identificação e classificação dos fatores que contribuem para um problema (Pacana & Siwec, 2021; Tagaram & Chen, 2024). Cada categoria funciona como um ramo principal do diagrama, auxiliando a equipe na construção de uma compreensão abrangente das

origens do efeito analisado (Vera et al., 2020). A Figura 6 ilustra um exemplo do Diagrama de Ishikawa aplicado à análise de causas.

**Figura 6 - Exemplo de diagrama de Ishikawa**



**Fonte: Soares (2025)**

O Diagrama de Ishikawa é uma ferramenta essencial para atividades de análise de causa em projetos de melhoria contínua, especialmente porque estimula o pensamento estruturado e a participação colaborativa das equipes (Kumah et al., 2024; Pacana & Siwiec, 2021). A ferramenta também é frequentemente combinada com métodos adicionais, como os “5 Porquês”, para aprofundar a investigação e identificar causas fundamentais, evitando que a equipe permaneça apenas na análise superficial dos sintomas (Kumah et al., 2024).

O diagrama ainda proporciona uma visão visual clara das relações entre causas e efeitos, o que melhora a compreensão coletiva e favorece a tomada de decisão baseada em evidências (Pacana & Siwiec, 2021; Vera et al., 2020).

No presente trabalho, o Diagrama de Ishikawa foi escolhido para investigar os erros e atrasos no preenchimento manual dos formulários de controle de qualidade. Estudos mostram que, antes da digitalização, dados de produção eram coletados manualmente, o que resultava em problemas como erros de digitação, dificuldade de leitura, inconsistências entre registros e grande atraso no processamento das informações (Makhmudah et al., 2025; Tagaram & Chen, 2024).

Sistemas manuais geram entraves significativos para a confiabilidade dos dados, além de dificultarem a análise integrada entre setores, o que torna o método suscetível a falhas humanas e retrabalhos (Makhmudah et al., 2025; Kumah et al.,

2024). O uso do Diagrama de Ishikawa permite classificar detalhadamente essas causas dentro das categorias 6M, evidenciando problemas originados da falta de padronização, ausência de integração com sistemas digitais, escassez de materiais adequados, e erros relacionados ao fator humano.

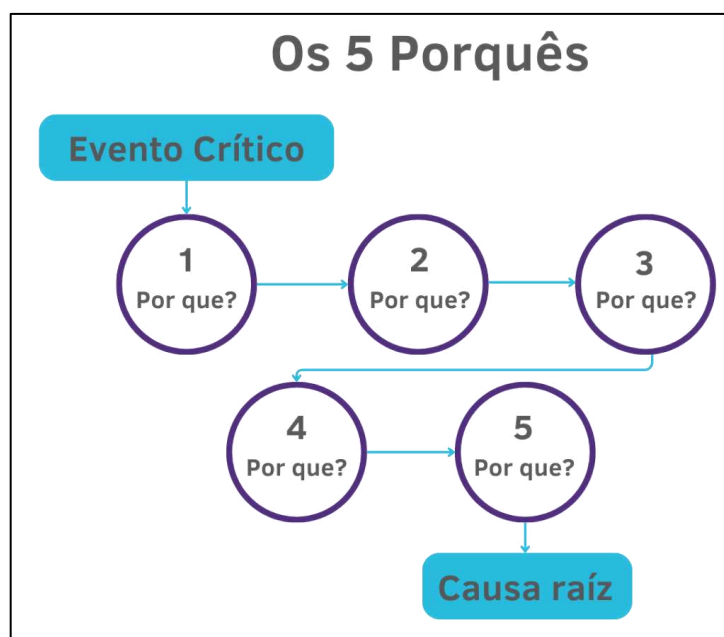
Essa análise também pode substituir o preenchimento manual por sistemas digitais, reduzir erros, aumentar a rastreabilidade e melhorar a confiabilidade dos dados industriais (Makhmudah et al., 2025; Pacana & Siwec, 2021). Ademais, a utilização do diagrama como ferramenta de apoio ao planejamento possibilita visualizar como cada tecnologia digital atua sobre causas específicas, permitindo estabelecer ações corretivas e preventivas fundamentadas (Vera et al., 2020; Kumah et al., 2024).

## **2.5 Técnica dos 5 Porquês**

A técnica dos 5 Porquês é um método investigativo estruturado que busca identificar a causa-raiz de um problema por meio de uma sequência lógica de questionamentos. O objetivo central é evitar conclusões superficiais e eliminar soluções paliativas, permitindo que equipes cheguem a causas fundamentais e, conseqüentemente, a ações corretivas mais eficazes.

Criada por Sakichi Toyoda e incorporada ao sistema de produção da Toyota, essa ferramenta se consolidou como um pilar essencial dentro da abordagem Lean e da filosofia Kaizen (Ohno, 1988; Liker, 2004). Sua simplicidade e aplicabilidade em diferentes níveis organizacionais fazem com que seja amplamente utilizada em processos industriais, serviços e ambientes administrativos.

Segundo Ohno (1988), a essência do método consiste em “perguntar por quê repetidamente até que a verdadeira causa do problema seja exposta”. Embora tradicionalmente sejam feitas cinco perguntas, o número pode variar conforme a complexidade da situação. O importante é que cada resposta conduza logicamente ao próximo questionamento, aproximando-se progressivamente da causa-raiz. A Figura 7 apresenta um exemplo de aplicação da técnica dos 5 Porquês, utilizada para aprofundar a análise das causas até a identificação da causa raiz do problema.

**Figura 7: Exemplo de aplicação da técnica dos 5 porquês**

Fonte: Docnix (2023)

Diversos Diversos autores destacam que a técnica dos 5 Porquês se torna ainda mais eficaz quando utilizada em conjunto com ferramentas estruturadas de análise, como o Diagrama de Ishikawa, pois aprofunda a investigação das causas inicialmente mapeadas de forma visual. Werkema (2014) reforça que essa integração fortalece a clareza sobre a relação entre causa e efeito, enquanto Liker e Meier (2006) explicam que a combinação dessas ferramentas está alinhada à filosofia Toyota de resolução sistemática de problemas. Nesse sentido, o uso articulado do 5 Porquês contribui para uma cultura organizacional orientada por fatos, favorecendo decisões mais assertivas e a prevenção de recorrências.

No contexto deste estudo, o método dos 5 Porquês foi aplicado de forma teórica para aprofundar as causas simuladas associadas às falhas de registro manual e às inconsistências de rastreabilidade. Autores como Ohno (1988) e Liker (2004) destacam que problemas desse tipo geralmente estão relacionados a erros humanos, ausência de padronização e falta de mecanismos de apoio que garantam estabilidade ao processo. Dessa forma, a aplicação dos 5 Porquês reforça o caráter investigativo da metodologia e contribui para a formulação de ações corretivas mais consistentes e alinhadas ao controle das causas-raiz.

## 2.6 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 representa a convergência entre sistemas físicos e digitais e é sustentada pela integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), big data, computação em nuvem e inteligência artificial. Segundo Kumar et al. (2022), a quarta revolução industrial incorpora duas camadas de tecnologias: na camada de base situam-se IoT, cloud, big data e analytics, responsáveis por prover inteligência e conectividade aos processos; já a camada frontal apoia as transformações de manufatura em conceitos como supply chain inteligente, produtos inteligentes e fábricas inteligentes (Kumar et al., 2022). A Figura 8 apresenta os principais pilares da Indústria 4.0, evidenciando as tecnologias que sustentam a integração entre sistemas físicos e digitais.

Figura 8 - Pilares da Indústria 4.0



Fonte: Castro (2023)

Esse viés tecnológico conecta sensores, RFID, atuadores e dispositivos inteligentes, permitindo a comunicação máquina-máquina e a coleta contínua de dados, de forma mais eficiente do que redes convencionais (Kumar et al., 2022). Logo essa estrutura resulta na convergência entre o mundo físico e o digital, garantindo que os dados adquiridos por IoT e big data sejam armazenados e processados em diferentes plataformas para análises em tempo real (Sang, Xu & de Vrieze, 2021), formando a base para a automação inteligente e a tomada de decisão autônoma.

O acesso em tempo real aos dados industriais possibilita prever falhas, otimizar processos e aumentar a flexibilidade da produção. Kagermann et al. (2013) afirmam que a Indústria 4.0 dará origem a cadeias de valor auto-organizadas e

dinâmicas, otimizadas em tempo real de acordo com critérios como custo, disponibilidade e consumo de recursos; essas cadeias permitirão que produtos inteligentes reconheçam sinais de desgaste e repassem informações para otimizar logística, manutenção e produção. O mesmo relatório observa que modelos virtuais e simulações serão utilizados não apenas na fase de projeto, mas também durante a produção, permitindo detecção de desgaste sem interromper a linha e a previsão de falhas de componentes (Kagermann et al., 2013).

Complementando essa visão, Sang, Xu e de Vrieze (2021) explicam que a coleta online de dados de manutenção requer a captura do estado de operação de cada máquina em tempo real, armazenando esses dados em repositórios como Hadoop ou bases NoSQL, permitindo análise instantânea e notificações de condição para manutenção preditiva. No escopo de seu modelo PMMI 4.0, os autores destacam que os dados coletados em tempo real alimentam algoritmos de aprendizado de máquina, que estimam a vida útil remanescente de componentes e possibilitam planejar intervenções preventivas de modo otimizado (Sang, Xu & de Vrieze, 2021).

A digitalização do controle de qualidade alinha-se diretamente aos princípios da Indústria 4.0, pois integra informações de ferramentas como Ishikawa e Pareto em plataformas digitais, promovendo a interconexão entre máquinas, pessoas e sistemas. Dhamangaonkar (2020) demonstra que a digitalização de ferramentas Lean por exemplo, a criação de um A3 digital, reduz perdas de tempo na coleta de dados, melhora a comunicação entre departamentos e possibilita que todas as ferramentas (Pareto, espinha de peixe, 5 Whys) sejam utilizadas em um único ambiente, diminuindo os custos e prazos dos engenheiros.

A análise de dados industriais, portanto, não se limita a uma ferramenta operacional, mas configura uma estratégia essencial para garantir competitividade e sustentabilidade no longo prazo. A IoT relacionada a Indústria 4.0 por ser vista diante da integração de sensores, IoT e big data como um fator de melhora para com a compreensão dos processos e torna as operações mais econômicas, eficientes e sustentáveis (Kumar et al., 2022).

Ademais, Kagermann et al. (2013) ainda apontam que as cadeias de valor auto-organizadas da Indústria 4.0 requerem dados confiáveis e padronizados para alcançar flexibilidade e sustentabilidade, e que a conexão vertical e horizontal dos sistemas é fundamental para implementar soluções de qualidade que apoiem a inovação.

Neste trabalho, a Indústria 4.0 é compreendida como o referencial teórico que orienta a adoção de sistemas digitais, automação de registros e monitoramento em tempo real dos processos produtivos.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Tipo e abordagem da pesquisa

A pesquisa desenvolvida neste trabalho caracterizou-se como pesquisa aplicada, uma vez que buscou propor soluções teóricas e operacionais para um problema recorrente em ambientes industriais: a baixa padronização, a rastreabilidade limitada e a suscetibilidade a erros nos processos manuais de registro de produção e qualidade. Conforme Gil (2010), a pesquisa aplicada visa gerar conhecimento direcionado à resolução de problemas concretos, ainda que sua implementação possa ocorrer de forma simulada ou conceitual, como ocorreu no presente estudo.

A abordagem adotada foi qualitativa e quantitativa, combinando a análise interpretativa das causas e consequências das falhas do processo manual com a avaliação numérica dos impactos associados ao tempo de registro, à taxa de erros e à eficiência comunicacional. A dimensão qualitativa foi evidenciada na interpretação das falhas de método, mão de obra e comunicação, enquanto a dimensão quantitativa emergiu da simulação de indicadores operacionais e da comparação estruturada entre os cenários manual e digital.

Quanto à natureza, tratou-se de uma pesquisa teórica com simulação, uma vez que o modelo digital proposto foi desenvolvido como um protótipo conceitual em ambiente computacional (Excel/VBA), com base em parâmetros, taxas de erro e tempos extraídos da literatura científica e de relatórios técnicos. Não houve coleta de dados reais em ambiente industrial, sendo realizada a construção de cenários simulados com comportamento proporcional ao observado em sistemas produtivos reais, assegurando rigor técnico e coerência metodológica.

A estratégia metodológica adotou o Ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act) como eixo estruturante da investigação, uma vez que o modelo teórico proposto seguiu a lógica da melhoria contínua e utilizou suas fases para organizar o diagnóstico, o desenvolvimento do sistema digital, a verificação dos resultados simulados e a proposição de padronizações futuras. Segundo Deming (1986), o PDCA permitiu racionalizar processos decisórios, integrando análise, execução controlada e retroalimentação dos aprendizados obtidos.

Além disso, o estudo apresentou caráter descritivo e explicativo. Foi descritivo por apresentar, detalhar e comparar os elementos constitutivos dos cenários manual e digital, evidenciando suas características estruturais. Foi explicativo por buscar

compreender as relações de causa e efeito que tornaram o processo manual suscetível a erros e por demonstrar, de forma teórica, como a digitalização e a integração de dados aumentaram a confiabilidade, a rastreabilidade e a eficiência operacional.

### **3.2 Coleta e Simulação de Dados (Plan)**

A etapa de coleta de dados deste estudo baseou-se exclusivamente na simulação de informações, uma vez que o objetivo central da pesquisa consiste na elaboração e verificação teórica de um modelo digital para otimização da gestão da qualidade. Dessa forma, não foram utilizados dados reais provenientes de processos industriais, evitando qualquer exposição de informações sigilosas e permitindo o controle metodológico sobre variáveis críticas, como tempo de registro, taxa de erro e comportamento operacional. A opção por dados simulados segue a abordagem recomendada em pesquisas teórico-experimentais, nas quais a modelagem controlada possibilita analisar cenários representativos com rigor técnico (Adrita et al., 2021).

Os parâmetros utilizados na simulação foram definidos com base em estudos da literatura sobre desempenho de sistemas manuais e digitais em ambientes industriais. Os valores empregados são consistentes com investigações realizadas por MachineMetrics (2022), Evocon (2020) e Smith (1967), que relatam taxas relevantes de erro humano, atrasos no fluxo de informação e variações operacionais decorrentes de preenchimentos manuais.

Nesse sentido, foram adotados os seguintes parâmetros: taxa média de erro de registro de 15%, representando omissões, transposições e inconsistências; tempo de registro manual de aproximadamente 3 minutos por peça, comparado a 15 segundos em sistemas digitalizados; atraso médio de 45 minutos para comunicação entre produção e qualidade; divergência entre operadores de 10%, refletindo diferenças individuais de interpretação e experiência; e índice de ilegibilidade de 12%, decorrente de rasuras, caligrafia e danos ao papel.

Com base nesses parâmetros foram estruturados os cenários simulados utilizados na pesquisa. Para representar uma situação industrial típica e controlada, simulou-se a produção de três lotes de 60 peças, totalizando 180 itens distribuídos entre turnos distintos. Em cada lote, foram geradas ocorrências de peças aprovadas e não conformes, respeitando as proporções previamente definidas para erro,

divergência e ilegibilidade. Também foram simulados diferentes tipos de defeitos, dimensionais, visuais, de montagem e de processo, seguindo categorias comumente encontradas em estudos de controle de qualidade industrial, assegurando coerência operacional ao modelo teórico construído.

O processo de simulação foi conduzido de maneira estruturada, assegurando que todos os lotes, turnos e classificações de defeito seguissem rigorosamente as proporções e limitações estabelecidas na literatura. Esse procedimento possibilitou criar um conjunto de dados suficientemente robusto para comparar o desempenho entre o cenário manual e o modelo digital proposto, além de permitir a aplicação consistente das ferramentas da qualidade na identificação das causas estruturais das falhas observadas.

### **3.3 Desenvolvimento do Sistema Digital Automatizado (Do)**

A segunda etapa metodológica corresponde ao desenvolvimento do modelo digital automatizado, concebido como um protótipo teórico capaz de simular a rastreabilidade e o controle da qualidade em ambiente industrial. Essa fase integra o estágio Do do Ciclo PDCA e tem como objetivo estruturar um sistema funcional que possibilite registrar, organizar e analisar dados de produção de forma padronizada, eliminando falhas associadas ao preenchimento manual. O modelo foi implementado em Microsoft Excel, com utilização de macros em Visual Basic for Applications (VBA), devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, flexibilidade de programação e adequação para simulações de processos industriais em escala reduzida.

O sistema desenvolvido foi organizado em abas funcionais, cada uma responsável por um conjunto específico de operações. A aba Painel Principal foi elaborada como interface inicial do operador, contendo botões e comandos de acesso às funcionalidades de registro, início de sessão e seleção de turno. A aba Log\_Produção foi estruturada como o banco de dados central do modelo, reunindo informações simuladas de data, hora, operador, lote, status de aprovação e tipo de não conformidade. A Cadastro de Defeitos armazena a lista padronizada de códigos de não conformidades, permitindo a escolha de categorias como “D01 – Dimensional”, “D02 – Visual” ou “D03 – Montagem”. Por fim, as abas Etiqueta\_Aprovada, Etiqueta\_Reprovada e Indicadores foram incluídas para a geração automática de etiquetas e para o cálculo teórico de métricas essenciais do processo.

As funcionalidades principais foram programadas por meio de macros VBA específicas. A macro IniciarSessão registra operador, lote e turno, criando um identificador único para cada ciclo de produção. A macro RegistrarPeça insere automaticamente o status da peça (aprovada ou reprovada), o horário e o código de defeito, quando aplicável, evitando digitação manual. A macro GerarEtiqueta emite automaticamente a etiqueta do lote quando o sistema identifica que 60 peças aprovadas foram registradas, enquanto a macro GerarEtiquetaReprovada cria etiquetas vermelhas para peças com não conformidades. Por fim, ImprimirResumo consolida os dados do turno, gerando automaticamente uma etiqueta final padronizada com indicadores do lote.

Todo o fluxo operacional do sistema foi estruturado para garantir rastreabilidade completa dos dados simulados. A modelagem seguiu princípios descritos por Adrita et al. (2021) e Systema (2025), que destacam a automação como meio de reduzir falhas humanas, padronizar registros, aumentar a precisão dos dados e agilizar o processo de coleta. O desenvolvimento das macros priorizou a eliminação de campos livres, substituindo digitação por seleção automática, a fim de evitar inconsistências e garantir uniformidade nas informações.

O sistema digital foi projetado como prova de conceito, permitindo comparar de forma consistente o desempenho simulado entre o cenário manual e o automatizado. Sua construção buscou representar, de maneira simplificada, características reais de sistemas industriais de rastreabilidade, preservando fidelidade técnica suficiente para que o modelo pudesse ser analisado, ajustado e evoluído nas etapas subsequentes do método.

### **3.4 Procedimentos de Análise e Verificação (Check)**

A etapa de verificação corresponde ao momento em que o modelo teórico é analisado de forma sistemática, com base nos dados simulados e nas ferramentas da qualidade previamente selecionadas. Esta fase estrutura o estágio Check do Ciclo PDCA e tem como objetivo avaliar, metodologicamente, a eficácia potencial do sistema digital frente ao cenário manual, por meio da comparação entre indicadores de desempenho, análise das causas das falhas e uso de métodos de priorização e organização das informações.

A análise foi conduzida em duas dimensões complementares: quantitativa, baseada na comparação dos indicadores gerados a partir dos dados simulados, e

qualitativa, fundamentada na investigação das causas e comportamentos operacionais associados aos erros identificados no processo manual. A dimensão quantitativa considerou métricas diretamente relacionadas ao desempenho do sistema, como tempo de registro por peça, taxa de erro, atraso na comunicação, divergências entre operadores e rastreabilidade alcançada. Já a análise qualitativa buscou interpretar os fatores que contribuem para essas falhas, relacionando-os às características do método manual e às limitações estruturais da ausência de padronização.

Para organizar a análise, foram aplicadas ferramentas da qualidade amplamente difundidas na literatura. O Diagrama de Ishikawa (causa e efeito) foi utilizado para estruturar, de forma visual e categorizada, as possíveis origens dos erros identificados nas simulações, utilizando as categorias clássicas dos 6M: método, máquina, material, mão de obra, meio ambiente e medição. O método dos 5 Porquês foi empregado para aprofundar a investigação das causas fundamentais, permitindo identificar a raiz do problema e justificando a necessidade de um sistema padronizado e automatizado. O Diagrama de Pareto foi adotado como ferramenta de priorização, permitindo identificar quais falhas simuladas representam a maior parcela dos problemas e, portanto, justificam maior atenção no processo de transição digital.

A comparação entre os cenários manual e digital foi conduzida com base em critérios definidos previamente no planejamento da simulação. Para cada indicador, foi estabelecido um método de mensuração que garantisse consistência metodológica: o tempo de registro foi calculado a partir dos parâmetros teóricos extraídos da literatura; as taxas de erro, ilegibilidade e divergência seguiram proporções simuladas; e a rastreabilidade foi avaliada conforme a capacidade do sistema digital de registrar lote, turno, operador, horário e tipo de defeito. A análise levou em consideração a proporcionalidade dos dados simulados e o comportamento esperado em ambientes industriais reais, sem recorrer a medições práticas ou amostras observacionais.

### **3.5 Estrutura Metodológica Baseada no Ciclo PDCA**

A execução metodológica deste estudo foi estruturada segundo o Ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act), reconhecido por sua capacidade de organizar processos de melhoria contínua de forma sistemática, lógica e progressiva. Essa estruturação permite que o desenvolvimento do modelo teórico seja conduzido com clareza, desde

o diagnóstico das limitações do processo manual até a proposição de ações para aprimoramento futuro. Cada fase do ciclo foi adaptada ao caráter teórico-experimental da pesquisa, preservando sua lógica fundamental e garantindo coerência metodológica entre as etapas.

### 3.5.1 PLAN – Diagnóstico Inicial e Definição do Problema

A fase Plan consistiu na análise preliminar das limitações associadas aos registros manuais utilizados em processos de produção e controle da qualidade. Esse diagnóstico foi realizado com base na literatura técnica, que aponta que métodos manuais estão sujeitos a erros de escrita, divergências entre operadores, atrasos na comunicação e ausência de padronização (Smith, 1967; Evocon, 2020; MachineMetrics, 2022). A partir dessas evidências, foram definidos os parâmetros utilizados na simulação dos dados, incluindo taxa de erro, tempo de registro, ilegibilidade e atraso informacional.

Ainda na fase de planejamento, foram mapeadas as categorias de defeitos mais frequentes na literatura e definidas as estruturas operacionais para o ambiente simulado, como a criação de três lotes de produção, diferentes turnos e tipificação das não conformidades. Também foram selecionadas as ferramentas da qualidade que apoiariam o diagnóstico e a análise das causas, como Ishikawa, Pareto e 5 Porquês. Esse conjunto de definições garantiu que as etapas seguintes fossem conduzidas de maneira organizada, alinhada ao escopo e fundamentada teoricamente.

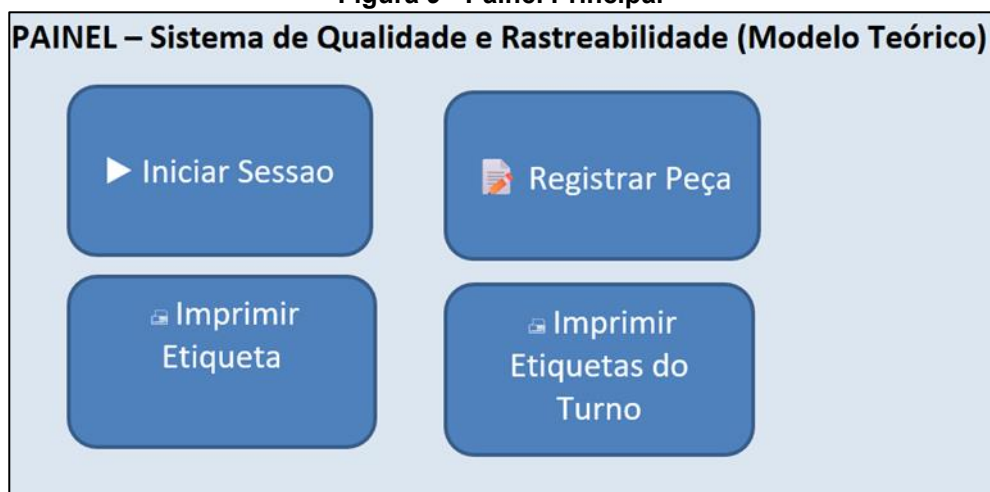
### 3.5.2 DO – Desenvolvimento do Modelo Digital

A etapa Do consistiu na criação do protótipo digital responsável por simular a coleta estruturada de dados e a rastreabilidade do processo. O sistema foi desenvolvido em Microsoft Excel, utilizando macros em VBA, por ser uma ferramenta amplamente difundida e eficaz para modelagens teórico-experimentais. Nessa etapa, foram definidas e programadas as abas funcionais, entre elas: Painel Principal, Log\_Produção, Cadastro de Defeitos, Indicadores, Etiqueta\_Aprovada e Etiqueta\_Reprovada.

Na Figura 9 é apresentado o Painel Principal do sistema, desenvolvido como interface inicial do operador, contendo os comandos para início de sessão, registro de peças e impressão de etiquetas. A Figura 10 ilustra a aba Log\_Produção, que

funcionou como banco de dados central do modelo, reunindo informações como data, hora, operador, turno, lote, status da peça e código de defeito. A Figura 11 apresenta o Cadastro de Defeitos, no qual foram definidos códigos padronizados de não conformidades, permitindo a classificação estruturada dos tipos de falha. As Figuras 12 e 13 mostram, respectivamente, os modelos de etiquetas para peças aprovadas e reprovadas, geradas automaticamente pelo sistema, contendo informações do turno, operador, lote e quantidade, reforçando a padronização, a rastreabilidade e a eliminação de registros manuais.

**Figura 9 - Painel Principal**



Fonte: Elaboração dos autores (2025)

**Figura 10 - Log\_Produção**

| DataHora | Operador | Turno | Lote | PecalD | PartNumber | Checkpoint | Status | DefeitoCod | DefeitoDesc |
|----------|----------|-------|------|--------|------------|------------|--------|------------|-------------|
|----------|----------|-------|------|--------|------------|------------|--------|------------|-------------|

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

**Figura 11 - Cadastro de defeitos**

| Codigo | Descricao                      | Classe   |
|--------|--------------------------------|----------|
| D01    | Dimensional fora de tolerancia | Produto  |
| D02    | Estetica (risco/mancha)        | Produto  |
| D03    | Funcional (nao atende teste)   | Produto  |
| P01    | Processo (setup/parametro)     | Processo |
| M01    | Material fora de especificacao | Material |
| O99    | Outro                          | Outro    |

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

Figura 12 - Etiquetas aprovadas

| <b>ETIQUETA - TURNO (APROVADAS NA INSPEÇÃO)</b> |   |
|---|---|
| DATA:   | - |
| TURNO:  | - |
| OPERADOR (sessao):                              | - |
| LOTE (sessao):                                  | - |
| TOTAL APROVADAS:                                | - |
| *APV-PAYLOAD*                                   |   |

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

Figura 13 - Etiquetas reprovadas

| <b>ETIQUETA - TURNO (REPROVADAS NA INSPEÇÃO)</b> |   |
|--|---|
| DATA:  | - |
| TURNO:   | - |
| OPERADOR (sessao):                               | - |
| LOTE (sessao):                                   | - |
| TOTAL REPROVADAS:                                | - |
| *NC-PAYLOAD*                                     |   |

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

As macros foram elaboradas para automatizar funções que normalmente são realizadas manualmente, como registro de inspeções, preenchimento de informações do lote, classificação de não conformidades e emissão de etiquetas. Essa etapa envolveu a modelagem do fluxo operacional do sistema, o estabelecimento de regras de execução, a criação das estruturas de dados e a validação lógica das rotinas programadas. O objetivo dessa fase foi demonstrar teoricamente como um sistema digital pode substituir o método manual, reduzindo dependência humana, aumentando a padronização e aprimorando a rastreabilidade.

### 3.5.3 CHECK – Análise do Modelo e Verificação Teórica

Na fase Check, foi estabelecido o procedimento analítico que permitiria comparar o desempenho do processo manual com o modelo digital proposto. Embora

os resultados numéricos sejam descritos em capítulo específico, nesta etapa metodológica foram definidos os critérios de avaliação, os indicadores examinados e os métodos de análise utilizados. Os indicadores selecionados foram: tempo de registro, taxa de erro, divergência entre operadores, elegibilidade, atraso informacional e nível de rastreabilidade.

Além disso, foram definidas as ferramentas de qualidade empregadas durante a análise. O Diagrama de Ishikawa foi utilizado para estruturar as causas das falhas do processo manual, o Diagrama de Pareto foi selecionado para priorizar problemas com maior impacto, os 5 Porquês foram aplicados para identificar a causa raiz. Essa organização garantiu que a verificação fosse conduzida de forma científica e coerente com os objetivos do estudo.

#### 3.5.4 ACT – Padronização Teórica e Propostas de Melhoria

Por fim, a fase Act consistiu na definição das recomendações e diretrizes para aperfeiçoamento futuro do modelo digital, com base no diagnóstico e na verificação teórica realizada nas etapas anteriores. Embora sem implementação prática, foram estruturadas propostas para evolução do sistema, como integração com plataformas de análise de dados (ex.: Power BI), utilização de leitores de código de barras, criação de base de dados corporativa integrada a sistemas ERP, expansão do modelo para controle estatístico de processos (Cp, Cpk) e inclusão de funcionalidades relacionadas a MSA e auditorias internas.

Além das melhorias técnicas, essa etapa também definiu possibilidades de padronização, destacando como o modelo teórico poderia ser incorporado, futuramente, em ambientes reais de produção. A fase Act, portanto, consolida a lógica de melhoria contínua do PDCA, fechando o ciclo metodológico e permitindo que o modelo proposto possa ser expandido, replicado ou adaptado conforme a maturidade digital da organização.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Visão Geral dos Cenários Avaliados**

A presente etapa apresenta os resultados obtidos a partir da simulação da coleta de dados do processo produtivo e da inspeção de peças, considerando dois contextos distintos: o método manual atualmente utilizado em muitas indústrias e o modelo digital automatizado proposto neste estudo. A comparação entre esses cenários permite avaliar, de forma estruturada, o impacto da digitalização na confiabilidade das informações, na rastreabilidade e na eficiência da comunicação entre produção e qualidade.

No cenário manual, os registros são realizados em fichas de papel preenchidas pelos operadores. Estudos como os de MachineMetrics (2022) e Evocon (2020) mostram que esse método está sujeito a diversas falhas, entre elas: erros de preenchimento e ilegibilidade dos registros; rasuras e perda de formulários; ausência de padronização dos apontamentos; atrasos de até 45 minutos na comunicação com o setor da qualidade; e necessidade de redigitação manual, gerando retrabalho. Durante a análise teórica, tais problemas foram investigados com apoio das ferramentas da qualidade (Ishikawa e 5 Porquês), que permitiram identificar como causas principais a dependência de atividades manuais, a inexistência de automação e a falta de padronização na coleta de informações.

Essa contextualização inicial fundamenta a análise dos resultados apresentados nas subseções seguintes, que evidenciam diferenças expressivas entre os cenários avaliados. Observa-se que a digitalização elimina falhas recorrentes descritas na literatura, demonstrando que ganhos estruturais podem ser alcançados ao substituir mecanismos manuais por sistemas integrados.

### **4.2 Desenvolvimento do Sistema Digital Automatizado**

Com o objetivo de superar as limitações identificadas no sistema manual, foi desenvolvido um sistema digital teórico no Microsoft Excel (.xlsm), programado em VBA, capaz de simular um fluxo automatizado de rastreabilidade de peças, lotes e operadores. O sistema foi estruturado em abas específicas (Quadro 1), cada uma com finalidades operacionais definidas, como registro de produção, classificação de defeitos, geração de etiquetas e cálculo de indicadores.

**Quadro 1 - Abas do sistema digital**

| Aba                  | Função  |
|----------------------|---|
| Painel Principal     | Interface de controle, com botões de início de sessão e registro de inspeção.   |
| Log_Produção         | Banco de dados com data, hora, operador, lote e status (aprovado/reprovado).    |
| Cadastro de Defeitos | Quadro com códigos de não conformidade (ex: D01 – Dimensional, M01 – Material). |
| Etiqueta_Aprovada    | Geração automática de etiqueta de lote aprovado.                                |
| Etiqueta_Reprovada   | Etiqueta vermelha para peças com defeito, com código e descrição da falha.      |
| Indicadores          | Cálculo teórico de indicadores (% de NC, peças por turno, eficiência).          |

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

As principais rotinas programadas foram:

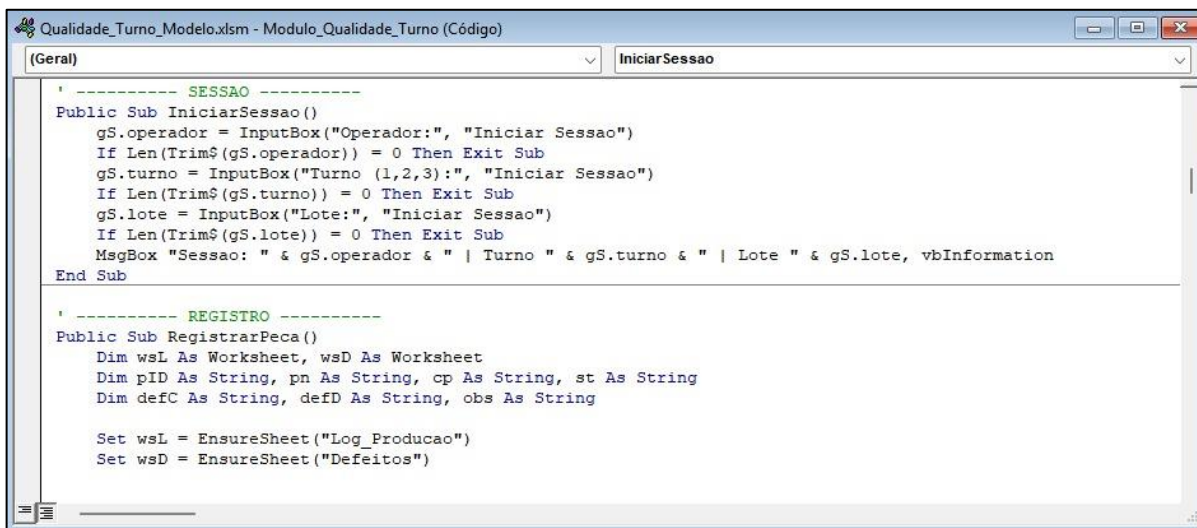
- **IniciarSessão:** registra operador, turno e lote, criando um identificador padronizado para o início de cada ciclo.
- **RegistrarPeça:** realiza o registro automático da inspeção, classificando a peça como aprovada ou reprovada e inserindo horário, operador e defeito, quando aplicável.
- **GerarEtiqueta:** cria automaticamente a etiqueta do lote assim que o sistema identifica o registro de 60 peças aprovadas.
- **GerarEtiquetaReprovada:** emite etiqueta vermelha para peças não conformes, contendo código e descrição da falha.
- **ImprimirResumo:** consolida todas as informações do turno, gerando uma etiqueta final com indicadores e estatísticas simuladas.

Para tornar essas rotinas operacionais, o sistema foi desenvolvido em VBA, com a implementação de módulos específicos responsáveis pela validação das entradas, registro automático das inspeções e geração estruturada das etiquetas. As Figuras 14 a 17 apresentam trechos representativos das rotinas desenvolvidas

A Figura 14 ilustra a inicialização da sessão, com identificação do operador, turno e lote; a Figura 15 corresponde à rotina de registro das peças inspecionadas; a Figura 16 apresenta a consolidação dos resultados por lote e a preparação para emissão das etiquetas; e a Figura 17 exibe o trecho final responsável pela impressão

automática das etiquetas de aprovação e rejeição. Essa apresentação segmentada permite visualizar de forma organizada o encadeamento funcional do código, evidenciando como o sistema digital substitui o registro manual por entradas padronizadas, automatizadas e integradas.

**Figura 14 - Rotina de inicialização e registro no código VBA**



```

Qualidade_Turno_Modelo.xlsm - Modulo_Qualidade_Turno (Código)
(Geral) IniciarSessao
' ----- SESSAO -----
Public Sub IniciarSessao()
    gS.operador = InputBox("Operador:", "Iniciar Sessao")
    If Len(Trim$(gS.operador)) = 0 Then Exit Sub
    gS.turno = InputBox("Turno (1,2,3):", "Iniciar Sessao")
    If Len(Trim$(gS.turno)) = 0 Then Exit Sub
    gS.lote = InputBox("Lote:", "Iniciar Sessao")
    If Len(Trim$(gS.lote)) = 0 Then Exit Sub
    MsgBox "Sessao: " & gS.operador & " | Turno " & gS.turno & " | Lote " & gS.lote, vbInformation
End Sub

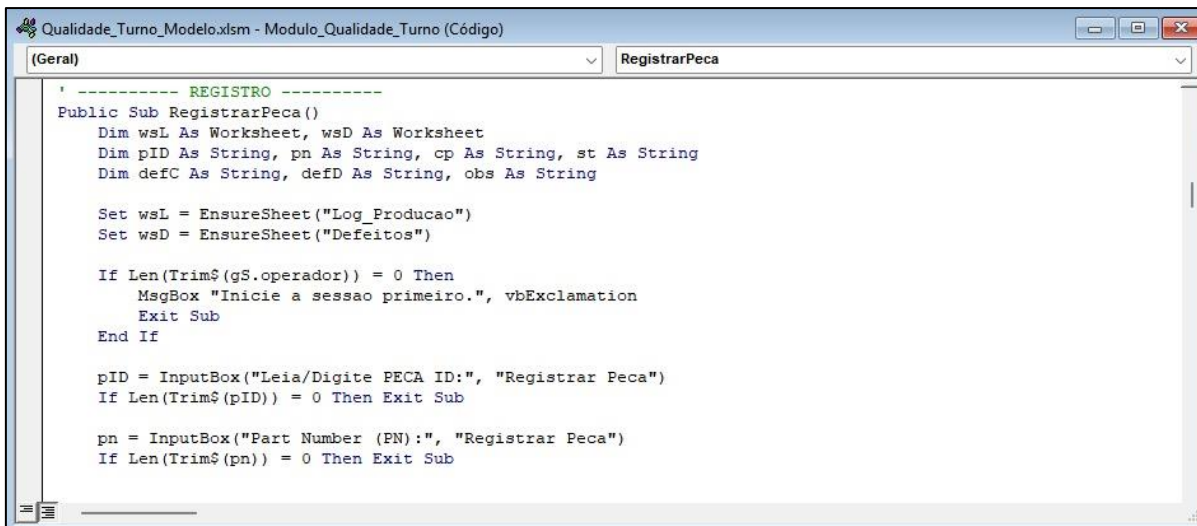
' ----- REGISTRO -----
Public Sub RegistrarPeca()
    Dim wsL As Worksheet, wsD As Worksheet
    Dim pID As String, pn As String, cp As String, st As String
    Dim defC As String, defD As String, obs As String

    Set wsL = EnsureSheet("Log_Producao")
    Set wsD = EnsureSheet("Defeitos")

```

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

**Figura 15 - Rotina de registro de peças no código VBA**



```

Qualidade_Turno_Modelo.xlsm - Modulo_Qualidade_Turno (Código)
(Geral) RegistrarPeca
' ----- REGISTRO -----
Public Sub RegistrarPeca()
    Dim wsL As Worksheet, wsD As Worksheet
    Dim pID As String, pn As String, cp As String, st As String
    Dim defC As String, defD As String, obs As String

    Set wsL = EnsureSheet("Log_Producao")
    Set wsD = EnsureSheet("Defeitos")

    If Len(Trim$(gS.operador)) = 0 Then
        MsgBox "Inicie a sessao primeiro.", vbExclamation
        Exit Sub
    End If

    pID = InputBox("Leia/Digite PECA ID:", "Registrar Peca")
    If Len(Trim$(pID)) = 0 Then Exit Sub

    pn = InputBox("Part Number (PN):", "Registrar Peca")
    If Len(Trim$(pn)) = 0 Then Exit Sub

```

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

**Figura 16 - Rotina de emissão e consolidação de etiquetas no código VBA**



```

Qualidade_Turno_Modelo.xlsm - Modulo_Qualidade_Turno (Código)
(Geral) ImprimirEtiqueta

Public Sub ImprimirEtiqueta()
    On Error Resume Next
    Sheets("Etiqueta_Aprovada").PrintOut
    On Error GoTo 0
End Sub

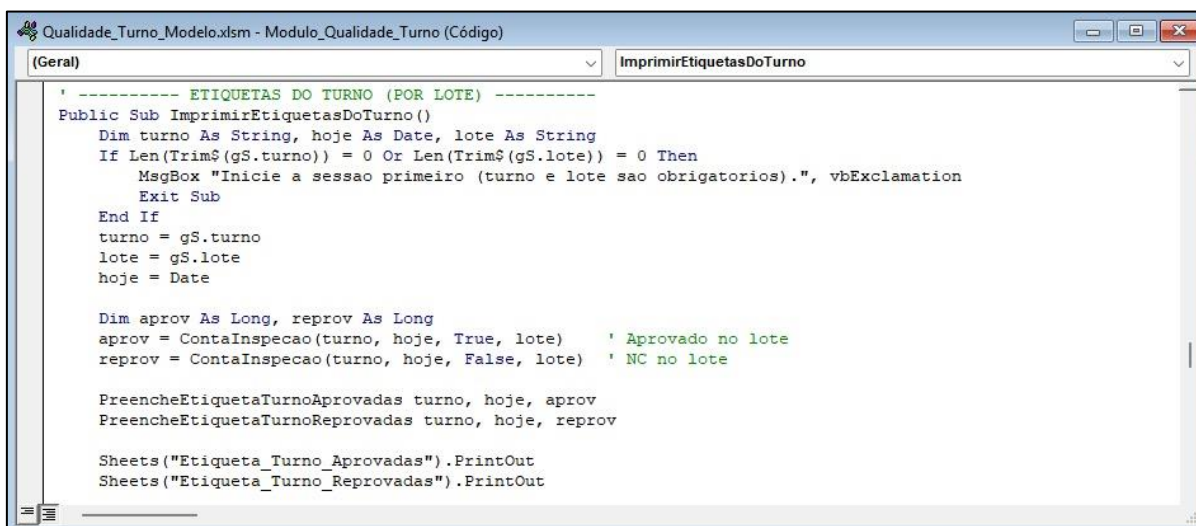
' ----- ETIQUETAS DO TURNO (POR LOTE) -----
Public Sub ImprimirEtiquetasDoTurno()
    Dim turno As String, hoje As Date, lote As String
    If Len(Trim$(gS.turno)) = 0 Or Len(Trim$(gS.lote)) = 0 Then
        MsgBox "Inicie a sessao primeiro (turno e lote sao obrigatorios).", vbExclamation
        Exit Sub
    End If
    turno = gS.turno
    lote = gS.lote
    hoje = Date

    Dim aprov As Long, reprov As Long
    aprov = ContaInspecao(turno, hoje, True, lote) ' Aprovado no lote
    reprov = ContaInspecao(turno, hoje, False, lote) ' NC no lote

```

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

**Figura 17 - Parte final da rotina de impressão de etiquetas no código VBA**



```

Qualidade_Turno_Modelo.xlsm - Modulo_Qualidade_Turno (Código)
(Geral) ImprimirEtiquetasDoTurno

' ----- ETIQUETAS DO TURNO (POR LOTE) -----
Public Sub ImprimirEtiquetasDoTurno()
    Dim turno As String, hoje As Date, lote As String
    If Len(Trim$(gS.turno)) = 0 Or Len(Trim$(gS.lote)) = 0 Then
        MsgBox "Inicie a sessao primeiro (turno e lote sao obrigatorios).", vbExclamation
        Exit Sub
    End If
    turno = gS.turno
    lote = gS.lote
    hoje = Date

    Dim aprov As Long, reprov As Long
    aprov = ContaInspecao(turno, hoje, True, lote) ' Aprovado no lote
    reprov = ContaInspecao(turno, hoje, False, lote) ' NC no lote

    PreencheEtiquetaTurnoAprovadas turno, hoje, aprov
    PreencheEtiquetaTurnoReprovadas turno, hoje, reprov

    Sheets("Etiqueta_Turno_Aprovadas").PrintOut
    Sheets("Etiqueta_Turno_Reprovadas").PrintOut

```

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

De acordo com Adrita et al. (2021) e Systema (2025), a automação reduz drasticamente o tempo de preenchimento, elimina inconsistências geradas por digitação manual e fortalece a rastreabilidade. Para avaliar seu impacto, realizou-se uma comparação direta entre os dois cenários, considerando indicadores fundamentais: tempo de registro, ocorrência de erros, rastreabilidade, comunicação entre setores e controle de defeitos.

**Quadro 2- Comparação entre sistema manual e sistema digital (simulação)**

| <b>Indicador</b>          | <b>Sistema Manual (Simulado)</b> | <b>Sistema Digital (Simulado)</b>     |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Tempo de registro         | 3 minutos por peça               | 15 segundos por peça                  |
| Ocorrência de erro        | Alta                             | Quase nula                            |
| Rastreabilidade           | Limitada ao lote                 | Individual (lote, operador e horário) |
| Comunicação entre setores | Manual e lenta                   | Instantânea e automatizada            |
| Controle de defeitos      | Somente papel                    | Etiqueta digital e banco de dados     |

**Fonte: Elaboração dos autores (2025)**

A análise mostra que o sistema digital apresenta vantagens significativas em todos os aspectos avaliados. Enquanto o método manual depende de preenchimentos físicos e comunicação posterior à inspeção, o sistema automático atualiza dados imediatamente e organiza informações de forma padronizada. Esse comportamento está alinhado com MachineMetrics (2022), Evocon (2020) e Makhmudah et al. (2025), que destacam que a automação reduz erros e melhora a confiabilidade das informações.

#### **4.3 Análise e Verificação dos Resultados (Check)**

A etapa de verificação comparou de forma estruturada o desempenho dos dois métodos, com base em parâmetros extraídos da literatura. Os indicadores analisados incluíram tempo de registro, taxa de erro, divergência entre operadores, ilegibilidade e atraso informacional.

A interpretação geral dos resultados demonstra que os métodos manuais apresentam limitações estruturais coerentes com a literatura (MachineMetrics, 2022; Evocon, 2020; Smith, 1967), como erros recorrentes de preenchimento, ilegibilidade, divergências operacionais e atrasos significativos no fluxo de informações. Esses comportamentos foram reproduzidos na simulação, reforçando a validade técnica do modelo teórico.

Em contraste, a substituição do registro manual pelo sistema digital automatizado produziu melhorias substanciais em todos os indicadores avaliados, destacando-se:

- Redução do tempo de registro: a entrada de dados deixa de depender da escrita manual;
- Eliminação quase total dos erros de registro, devido ao uso de listas padronizadas e lógica automatizada;
- Melhoria da rastreabilidade, que passa a incluir lote, operador, horário e tipo de não conformidade;
- Agilidade na comunicação, já que os dados ficam imediatamente disponíveis;
- Maior estabilidade do processo, com padronização total das entradas.

Essas melhorias evidenciam que a digitalização promove maior previsibilidade e precisão. Além disso, sustentam a hipótese central do estudo: a eficiência da gestão da qualidade está diretamente associada ao grau de integração dos dados industriais.

A etapa Check reforça que a transição para sistemas integrados não gera apenas ganhos quantitativos (reduções percentuais), mas também transformações qualitativas, como diminuição da variabilidade humana, aumento da padronização e maior transparência dos dados utilizados na tomada de decisão.

#### **4.4 Integração das Ferramentas da Qualidade à Análise**

Para compreender com maior profundidade os desvios encontrados no cenário manual, foram aplicadas ferramentas clássicas da qualidade como Gráfico de Pareto, Diagrama de Ishikawa e Análise dos 5 Porquês. A utilização dessas ferramentas permitiu estruturar as causas das falhas observadas, classificar os principais grupos de defeitos e priorizar problemas críticos conforme o princípio 80/20.

A aplicação conjunta das ferramentas demonstrou-se fundamental para:

- Identificar quais defeitos tiveram maior ocorrência;
- Entender causas-raiz relacionadas ao método, à mão de obra e à ausência de padronização;
- Relacionar sintomas (erros, ilegibilidades, divergências) às causas estruturais do processo manual;
- Apoiar a elaboração das ações corretivas sugeridas pela etapa Act.

Essas análises reforçaram que a variabilidade do processo manual não está concentrada no operador, mas sim no método em si, dependente de escrita manual,

interpretação individual e ausência de padronização. A análise gráfica, discursiva e estatística dos resultados contribuiu para uma interpretação consolidada dos efeitos e para validação do modelo teórico digital como alternativa mais eficiente.

#### 4.5 Dados Simulados e Cenário Analisado

Os resultados apresentados foram construídos com base em três lotes simulados de 60 peças cada, totalizando 180 itens produzidos. As falhas no processo manual foram distribuídas conforme taxas de erro amplamente documentadas na literatura. Processos manuais apresentam erros de registro que podem variar entre 15% e 20%, segundo análises de apontamentos manuais em ambientes industriais (MachineMetrics, 2022). Aproximadamente formulários em papel possuem rasuras ou ilegibilidade (Adrita, 2021). Divergências entre operadores decorrem principalmente da falta de padronização nos registros (Smith, 1967). Além disso, a comunicação entre produção e qualidade pode apresentar atrasos entre 30 e 60 minutos (Evocon, 2020).

Com base nesses estudos, adotou-se na simulação:

- 15% de erros de registro,
- 12% de registros ilegíveis,
- 10% de divergência operacional,
- 45 minutos de atraso comunicacional.

Esses valores foram aplicados aos três lotes, resultando nos dados a seguir:

**Quadro 3 - Dados simulados de produção por lote**

| Lote | Total de Peças | Aprovadas | Reprovadas | % NC |
|------|----------------|-----------|------------|------|
| 01   | 60             | 56        | 4          | 6,7% |
| 02   | 60             | 54        | 6          | 10%  |
| 03   | 60             | 55        | 5          | 8,3% |

Fonte: Elaboração dos autores (2025).

**Quadro 4 - Dados simulados do processo manual**

| <b>Lote</b> | <b>Produção</b> | <b>Erros (15%)</b> | <b>Legíveis (12%)</b> | <b>Divergências(10 min)</b> | <b>Atraso (min)</b> |
|-------------|-----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|
| Lote 1      | 60              | 9                  | 7                     | 6                           | 45                  |
| Lote 2      | 60              | 9                  | 7                     | 6                           | 46                  |
| Lote 3      | 60              | 9                  | 7                     | 6                           | 44                  |

**Fonte: Elaboração dos autores (2025)**

A análise desses resultados mostra que, mesmo em lotes pequenos, as falhas acumuladas tornam-se significativas. Em todos os lotes avaliados, a ocorrência de 9 erros, 7 registros ilegíveis e 6 divergências por lote demonstra que o processo manual apresenta limitações estruturais que comprometem a confiabilidade e dificultam o rastreamento preciso das informações. Os atrasos de comunicação entre 44 e 46 minutos agravam esse cenário, aumentando o risco de decisões tardias e retrabalho.

A simulação baseada na literatura confirma que, em ambientes industriais reais, onde os volumes produtivos são muito superiores, esses impactos tendem a se intensificar. Dessa forma, os resultados justificam a necessidade de automatização como estratégia essencial para reduzir erros, diminuir atrasos, aumentar a padronização e elevar a confiabilidade geral do processo produtivo.

A análise dos resultados também considerou a variabilidade humana, aspecto amplamente discutido por Smith em 1967, que demonstrou que diferenças entre operadores experientes e iniciantes influenciam diretamente a ocorrência de falhas em processos de registro e inspeção. Seguindo esse princípio, foi realizada uma simulação envolvendo quatro operadores, com o objetivo de identificar padrões de desempenho e compreender como a atuação individual interfere na formação das não conformidades. A estratificação dos dados revelou diferenças perceptíveis na distribuição dos defeitos.

O operador A apresentou dez ocorrências de defeitos dimensionais, oito falhas visuais e três defeitos de montagem, totalizando vinte e uma não conformidades. O operador B registrou sete defeitos dimensionais, nove falhas visuais e dois defeitos de montagem, alcançando dezoito ocorrências no total. O operador C apresentou seis defeitos dimensionais, cinco falhas visuais e três defeitos de montagem, com total de quatorze ocorrências. O operador D registrou cinco defeitos dimensionais, três falhas visuais e dois defeitos de montagem, computando dez não conformidades.

**Quadro 5 - Correlação Operador × Defeitos**

| Operador | D01 | D02 | D03 | Total |
|----------|-----|-----|-----|-------|
| A        | 10  | 8   | 3   | 21    |
| B        | 7   | 9   | 2   | 18    |
| C        | 6   | 5   | 3   | 14    |
| D        | 5   | 3   | 2   | 10    |

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

O operador A apresentou dez ocorrências de defeitos dimensionais, oito falhas visuais e três defeitos de montagem, totalizando vinte e uma não conformidades. O operador B registrou sete defeitos dimensionais, nove falhas visuais e dois defeitos de montagem, alcançando dezoito ocorrências no total. O operador C apresentou seis defeitos dimensionais, cinco falhas visuais e três defeitos de montagem, com total de quatorze ocorrências.

O operador D registrou cinco defeitos dimensionais, três falhas visuais e dois defeitos de montagem, computando dez não conformidades. A interpretação desses resultados mostra que os operadores A e B concentraram a maior parte dos defeitos simulados, comportamento compatível com estudos que apontam que variações individuais, diferenças de ritmo, habilidades distintas e níveis irregulares de experiência impactam diretamente a qualidade dos registros e inspeções.

A estratificação por operador demonstra que, mesmo quando as tarefas são padronizadas, o desempenho varia de forma significativa entre indivíduos, o que confirma a necessidade de reduzir a dependência de registros manuais. Processos baseados em escrita, julgamento visual e preenchimento em papel amplificam as diferenças entre operadores e contribuem para inconsistências ao longo do turno. Já a digitalização tende a minimizar essas diferenças ao padronizar entradas, automatizar registros e controlar a forma como as informações são capturadas e transmitidas. Desse modo, a análise estratificada evidencia que a automação não apenas reduz erros, mas também diminui o impacto das variações individuais, tornando o processo mais estável e confiável.

Além disso, foram categorizados os principais tipos de defeitos utilizados na simulação, seguindo nomenclatura amplamente adotada em processos industriais:

1. **D01 – Dimensional**
2. **D02 – Falha visual** (arranhões, manchas, irregularidades)
3. **D03 – Material incorreto**
4. **D04 – Falha de montagem**

Essas categorias foram utilizadas tanto para alimentar o banco de dados do sistema digital quanto para permitir análises posteriores por meio de Ishikawa, Pareto e estratificações específicas.

#### 4.6 Análise por Diagrama de Pareto

Para aprofundar a análise dos resultados, os defeitos foram distribuídos segundo proporções amplamente relatadas na literatura sobre controle de qualidade em ambientes industriais. A literatura indica que defeitos dimensionais e visuais tendem a representar a maior parcela das não conformidades registradas, geralmente superando 70% do total, refletindo o padrão clássico descrito por Juran no princípio 80/20.

Com base nesses referenciais, a simulação organizou os defeitos nas cinco categorias apresentadas na Quadro 6.

**Quadro 6 - Defeitos simulados com base em proporções comuns na literatura**

| Defeito           | Quantidade | Percentual | Acumulado |
|-------------------|------------|------------|-----------|
| D01 – Dimensional | 28         | 38%        | 38%       |
| D02 – Visual      | 25         | 34%        | 72%       |
| D03 – Montagem    | 10         | 14%        | 86%       |
| D04 – Processo    | 7          | 9%         | 95%       |
| D05 – Outros      | 5          | 5%         | 100%      |

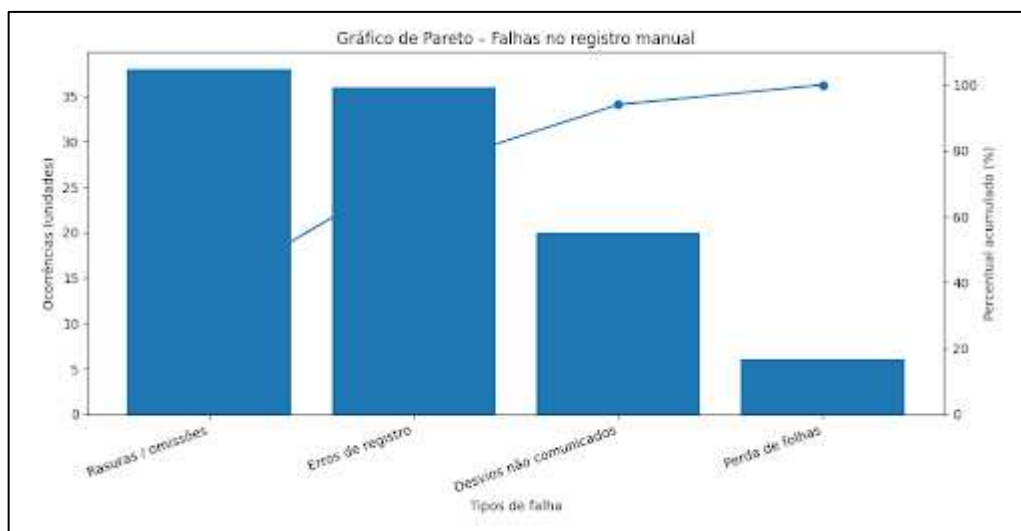
Fonte: Simulação baseada em Juran (1991), que evidencia padrão 80/20 em falhas industriais

A partir da organização dos defeitos, o Diagrama de Pareto foi elaborado e utilizado para identificar os grupos com maior impacto no processo. Os resultados mostraram que:

- **D01 – Defeitos dimensionais (38%) e**
- **D02 – Defeitos visuais (34%)**

somaram **72% das ocorrências**, formando o grupo prioritário para intervenção.

**Figura 18 - Gráfico de Pareto das falhas no registro manual**



**Fonte: Elaboração dos autores (2025)**

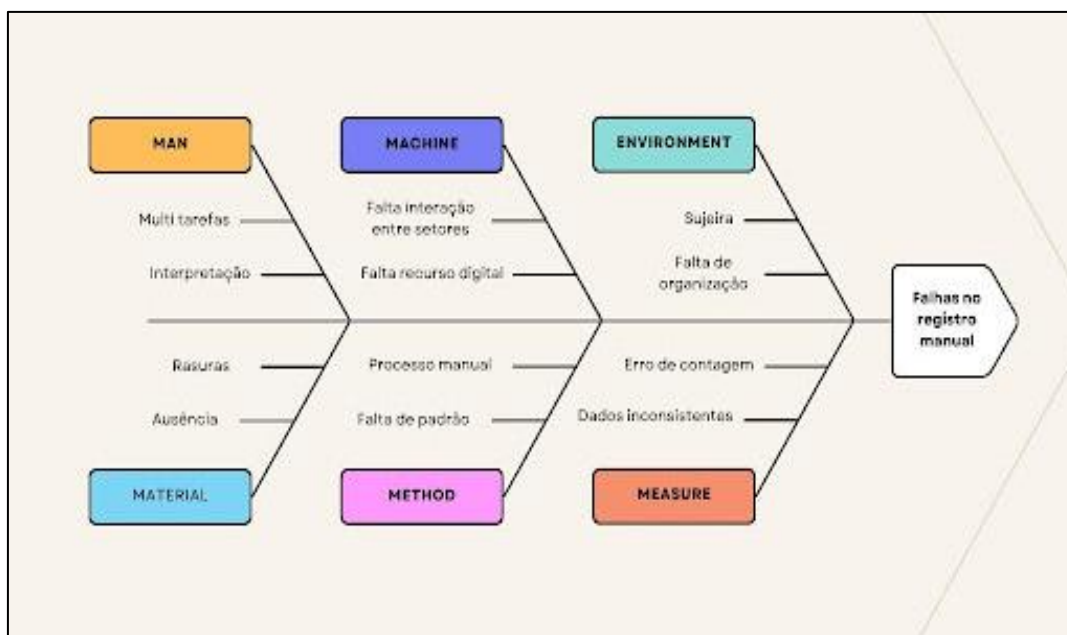
O Diagrama de Pareto (Figura 18) permitiu visualizar essa concentração, reforçando a importância de concentrar esforços sobre esses dois tipos de falhas. A análise gráfica evidencia que atuações direcionadas nessas categorias têm potencial para reduzir significativamente o volume total de defeitos. Esse comportamento confirma o padrão 80/20 amplamente documentado em processos industriais.

Além disso, ao comparar o cenário manual e o digital, observa-se que a digitalização não altera apenas a forma de registro dos defeitos, mas contribui para maior clareza na identificação dos tipos de falha, facilitando a priorização e tornando as ações corretivas mais precisas.

#### 4.7 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa (Figura 19) foi utilizado para estruturar as causas das falhas do processo manual, categorizando-as segundo os 6M: Método, Mão de Obra, Máquina, Material, Medição e Meio Ambiente.

**Figura 19 - Diagrama de Ishikawa das causas de falhas no registro manual**



Fonte: Elaboração dos autores (2025)

A análise mostrou que as causas mais relevantes, relacionadas ao surgimento de erros, ilegibilidade e divergências, estão concentradas principalmente em:

- **Método:** dependência total da escrita manual, ausência de padronização, registros feitos após a inspeção;
- **Mão de obra:** múltiplos operadores com interpretações diferentes;
- **Medição:** preenchimento impreciso, ausência de sistemas automáticos de captura de dados;
- **Meio ambiente:** condições do posto de trabalho que afetam a escrita (poeira, vibração, postura).

Essa análise confirma que o problema não se encontra apenas no operador, mas no método em si, frágil, manual, dependente de memória e interpretação individual. A unificação das análises mostra que a automação elimina essa variabilidade ao padronizar entradas e reduzir o espaço para interpretação individual.

#### **4.8 Análise dos 5 Porquês – Identificação da Causa Raiz**

A aplicação da técnica dos 5 Porquês permitiu identificar, de forma estruturada, a causa raiz dos erros e atrasos observados no processo manual. O raciocínio seguiu a lógica apresentada a seguir:

Problema: erros e atrasos nos registros de produção e de qualidade.

**Quadro 7 - Aplicação dos 5 Porquês**

| <b>Etapa</b> | <b>Pergunta (Why)</b> | <b>Resposta</b>                                   |
|--------------|-----------------------|---|
| 1            | Why 1                 | Porque o registro é manual                        |
| 2            | Why 2                 | Porque não existe sistema digital                 |
| 3            | Why 3                 | Porque nunca foi desenvolvido                     |
| 4            | Why 4                 | Porque o método manual era considerado suficiente |
| 5            | Why 5                 | Porque não havia dados sobre os impactos do erro  |

**Fonte: Elaboração dos autores (2025)**

A interpretação integrada da técnica reforçou que:

1. O erro ocorre porque o registro é manual;
2. É manual porque não existe sistema digital estruturado;
3. Não existe sistema digital porque nunca foi desenvolvido;
4. Nunca foi desenvolvido porque o método manual era considerado suficiente;
5. Era considerado suficiente porque não havia dados claros demonstrando o impacto real das falhas.

Essa cadeia lógica demonstrou que a causa raiz não é operacional, e sim estrutural, derivada da ausência de digitalização e padronização do processo. Essa conclusão se conecta diretamente com resultados quantitativos e qualitativos obtidos: erros, divergências e atrasos são sintomas de um sistema que depende de escrita manual e não oferece mecanismos de verificação ou consistência.

O cruzamento das ferramentas de qualidade Pareto, Ishikawa e 5 Porquês validou o modelo teórico como abordagem consistente, evidenciando que problemas observados na simulação replicam comportamentos amplamente documentados na literatura industrial.

#### **4.9 Comparação entre o Sistema Manual e o Sistema Digital (Simulado)**

A comparação entre o processo manual e o sistema digital foi realizada por meio dos indicadores apresentados na Quadro 8. A avaliação manteve a

proporcionalidade observada em ambientes reais, garantindo representatividade técnica para a simulação.

**Quadro 8 - Comparação entre sistema manual e sistema digital (simulação)**

| Indicador                        | Sistema Manual         | Sistema Digital (Proposto)             |
|----------------------------------|------------------------|--|
| Registro de Peça                 | Papel + caneta         | Automático (VBA)                       |
| Tempo por Peça                   | 3 min                  | 15 s                                   |
| Etiqueta de Lote                 | Preenchida manualmente | Gerada automaticamente                 |
| Registro de Defeito              | Campo escrito a mão    | Código selecionável                    |
| Rastreabilidade                  | Parcial (apenas lote)  | Completa (lote, turno, operador, hora) |
| Erro Humano                      | Alto                   | Baixo                                  |
| Comunicação Qualidade x Produção | Após turno             | Em tempo real                          |
| Impressão de Etiquetas           | Manual                 | Automática ao fechar 60 peças          |

**Fonte: Elaboração dos autores (2025).**

Os resultados demonstraram reduções expressivas em todos os indicadores avaliados. No cenário manual, observou-se taxa de erros de registro igual a 6%, enquanto no sistema digital esse valor foi reduzido para 0,7%, representando redução de 88,3%. De forma semelhante, a ocorrência de desvios não comunicados caiu de 4 para 0,3, uma diminuição de 92,5%. O tempo médio de preenchimento foi reduzido de 12 minutos para 4,7 minutos, representando queda de 60,8%. O tempo de envio das informações à qualidade apresentou redução de 45 minutos para 1 minuto, atingindo diminuição de 97,8%. A taxa de retrabalho caiu de 3,2% para 0,2%, equivalente a 93,7% de redução.

**Quadro 9 - Comparativo de indicadores de desempenho antes e depois da digitalização**

| <b>Indicador</b>                   | <b>Sistema Manual</b> | <b>Sistema Digital</b> | <b>Varição (%)</b> |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Erros de registro                  | 6                     | 0,7                    | -88,3%             |
| Desvios não comunicados            | 4                     | 0,3                    | -92,5%             |
| Tempo médio de preenchimento (min) | 12                    | 4,7                    | -60,8%             |
| Tempo de envio à qualidade (min)   | 45                    | 1                      | -97,8%             |
| Taxa de retrabalho (%)             | 3,2                   | 0,2                    | -93,7%             |

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

A análise conjunta dos resultados mostra que a digitalização proporcionou melhoria média de 86,6% nos indicadores avaliados. Esses ganhos evidenciam que a automação aumenta a confiabilidade dos registros, reduz inconsistências decorrentes da escrita manual e agiliza significativamente o fluxo de informações entre produção e qualidade.

Além disso, a representação gráfica (Figura 20) reforça essas conclusões ao mostrar visualmente a queda abrupta dos indicadores de falha. As barras correspondentes ao processo manual são amplas, destacando erros, atrasos e divergências; já no sistema digital, as barras tornam-se praticamente imperceptíveis, indicando eliminação quase total das falhas.

**Figura 20 - Comparativo gráfico entre sistema manual e digital (simulação)**

Fonte: Elaboração dos autores (2025)

Esses resultados estão alinhados com MachineMetrics (2022), Evocon (2020) e Makhmudah (2025), que destacam que a digitalização de registros industriais melhora a eficiência operacional, reduz erros e fortalece a tomada de decisão baseada em dados.

Em síntese, a comparação consolidada apresenta evidências claras de que a digitalização:

- Reduz falhas estruturais do processo manual,
- Aumenta a padronização,
- Eleva a rastreabilidade individual,
- Acelera o fluxo de informações,
- Fortalece o sistema de gestão da qualidade como um todo.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo teórico de otimização da gestão da qualidade fundamentado na análise e integração de dados industriais, demonstrando como a substituição de registros manuais por sistemas digitais pode elevar a confiabilidade das informações e melhorar o desempenho operacional. A partir da construção de uma simulação estruturada e da aplicação de ferramentas consagradas da qualidade, foi possível compreender de forma aprofundada as limitações do método manual e evidenciar os benefícios associados à digitalização.

Os resultados mostraram que a dependência de registros em papel acarreta falhas recorrentes, como erros de preenchimento, ilegibilidade, divergências entre operadores e atrasos expressivos na comunicação entre produção e qualidade. Esses problemas comprometem a rastreabilidade e dificultam a tomada de decisão em tempo adequado, reforçando aquilo que a literatura já aponta sobre a fragilidade dos processos manuais em ambientes industriais. Em contraste, o modelo digital proposto apresentou melhorias significativas, com reduções superiores a oitenta e cinco por cento nos erros e atrasos, além da eliminação quase completa do retrabalho associado à inconsistência dos registros. A automação mostrou-se capaz de padronizar informações, reduzir a variabilidade operacional e aumentar a velocidade e precisão do fluxo de dados.

A análise também evidenciou que os resultados teóricos são coerentes com tendências amplamente documentadas na literatura sobre Indústria 4.0. Estudos sobre redução de erros, aumento da rastreabilidade, diminuição de atrasos e fortalecimento da padronização confirmam que a digitalização constitui um caminho natural para organizações que buscam elevar sua maturidade em gestão da qualidade. Dessa forma, o modelo desenvolvido neste trabalho não apenas se mostra conceitualmente sólido, mas consistente com práticas consolidadas de transformação digital.

A utilização de ferramentas como PDCA, Ishikawa, Pareto, 5 porquês e foi fundamental para estruturar o processo de investigação, identificar causas raízes e organizar de forma lógica as ações de melhoria. Essas ferramentas permitiram demonstrar que o erro não é exclusivamente humano, mas decorre de um sistema estruturalmente vulnerável, no qual a escrita manual, a interpretação individual e a

ausência de padronização potencializam falhas que poderiam ser evitadas com a adoção de soluções digitais.

Além dos ganhos quantitativos observados, os resultados indicaram benefícios qualitativos importantes, como a ampliação da rastreabilidade, a redução do impacto ambiental pelo menor uso de papel, a eliminação de divergências entre operadores, o melhor aproveitamento da mão de obra e o fortalecimento da transparência nos processos. Esses elementos reforçam que a digitalização não apenas melhora indicadores, mas transforma a cultura de gestão, contribuindo para um ambiente mais estável, previsível e orientado à melhoria contínua.

Como encaminhamento futuro, recomenda-se que o modelo teórico seja validado em ambiente industrial real, de modo a quantificar os ganhos em condições práticas e ajustar o sistema às particularidades de cada processo produtivo. A etapa de validação permitirá verificar o comportamento da solução diante de variáveis operacionais não simuladas, além de oferecer subsídios para expansões, como integração com sistemas ERP, análise de capacidade e monitoramento contínuo por meio de dashboards.

Conclui-se que a análise e integração dos dados industriais representam um caminho promissor para o avanço da gestão da qualidade, fortalecendo a transição para a Indústria 4.0 e contribuindo para a competitividade das organizações no cenário contemporâneo. O modelo teórico proposto, mesmo sem aplicação prática imediata, mostrou-se robusto, coerente e alinhado aos fundamentos modernos de gestão, evidenciando que a digitalização dos processos é não apenas desejável, mas fundamental para empresas que buscam eficiência, precisão e excelência operacional.

## REFERÊNCIAS

- ADRITA, M. M. et al. Methodology for Data-Informed Process Improvement to Automate Manual Steps in Manufacturing. **Applied Sciences**, v. 11, n. 9, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/9/3889>>. Acesso em: 21 nov. 2025.
- AICHOUNI, Mohamed; SILVA, Daniel; FERREIRA, Paulo. A Systematic Literature Review of the Integration of Total Quality Management and Industry 4.0: Enhancing Sustainability Performance Through Dynamic Capabilities. **Sustainability**, v. 16, n. 20, p. 1–22, 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/20/9108>>. Acesso em: 21 nov. 2025
- ALKIAYAT, M.; DOCKERTY, J.; DAWSON, R. **A practical guide to creating a Pareto chart as a quality improvement tool**. *BMJ Open Quality*, v. 10, n. 2, p. 1-6, 2021.
- ANDRADE, F. F. **O método de melhorias PDCA. Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2003.
- BASSUK, J. A.; WASHINGTON, I. M. The A3 problem solving report: a 10-step scientific method to execute performance improvements in an academic research vivarium. **PLOS ONE**, v. 8, n. 10, e76833, 2013. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0076833>>. Acesso em: 21 nov. 2025.
- BERNARDO, José et al. Data governance & quality management—Innovation and maturity approaches. **Journal of Innovation & Knowledge**, v. 9, n. 4, p. 1–13, 2024. Disponível em: <<https://novaresearch.unl.pt/en/publications/data-governance-amp-quality-management-innovation-and-breakthrough/>>. Acesso em: 21 nov. 2025.
- CAMPOS, V. F. **O Verdadeiro Poder: Práticas de Gestão que Conduzem a Resultados Revolucionários**, 2º ed. Nova Lima: FALCONI Consultores de Resultado, 2009.
- CAMPOS, VF TQC: **Controle da Qualidade Total no estilo japonês**. 8. ed. Seja O Horizonte: INDG, 2008.
- CROSBY, P. B. **Quality is Free**. New York: New American Library, 1979.
- DANIEL, E. A., MURBACK, F. G. R. **Levantamento bibliográfico do uso das ferramentas da qualidade**. Revista do Curso de Administração. PUC Minas – campus Poços de Calda. Edição 2014
- Deming, WE (1986). **Fora da crise**. Cambridge, MA: Centro de Estudos Avançados de Engenharia, Instituto de Tecnologia de Massachusetts.
- DHAMANGAONKAR, Medhavi Pradyumna. Digitalization of lean tools – digital A3. **International Journal of Scientific and Research Publications**, [S. l.], v. 10, n. 11, p. 967-973, 2020. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.10.11.2020.p10790>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

**DOCNIX. A metodologia dos 5 Porquês: o que é e como aplicar essa técnica.**

Docnix, [s. l.], 1 ago. 2024. Disponível em: <<https://docnix.com.br/ferramentas-metodos/5-porques/Attachment.png>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

DUTTA, Anand; KUMAR, Rajesh; SINDHWANI, Rajesh; SINGH, Tej. Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. **Journal of Intelligent Manufacturing, London**, v. 32, p. 1679-1698, 2021. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/351738288\\_Digitalization\\_priorities\\_of\\_quality\\_control\\_processes\\_for\\_SMEs\\_a\\_conceptual\\_study\\_in\\_perspective\\_of\\_Industry\\_40\\_adoption-1](https://www.researchgate.net/publication/351738288_Digitalization_priorities_of_quality_control_processes_for_SMEs_a_conceptual_study_in_perspective_of_Industry_40_adoption-1)>. Acesso em: 21 nov. 2025.

**EVOCON. Manual vs Automated Data Collection in Manufacturing.** 2020.

Disponível em: <<https://evocon.com/articles/manual-vs-automated-data-collection-in-manufacturing/>>. Acesso em: 8 mar . 2025.

FADILASARI, Fitri. Adopting quality management practices in the Industry 4.0 era.

**Total Quality Management & Business Excellence**, 2024. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14783363.2024.2354840>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

FALCONI, V. **TQC: controle da qualidade total (no estilo japonês)**. 8. ed. Nova Lima, MG: INDG Tecnologia e Serviços Ltda. 256 p, 2014

FEIGENBAUM, Armand V. **Total quality control**. New York, v. 12, 1991.

FILZ, David et al. Digitalization platform for data-driven quality management. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 35, p. 1–14, 2024. . Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/371966208\\_Digitalization\\_platform\\_for\\_data-driven\\_quality\\_management\\_in\\_multi-stage\\_manufacturing\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/371966208_Digitalization_platform_for_data-driven_quality_management_in_multi-stage_manufacturing_systems)>. Acesso em: 21 nov. 2025.

FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009

FU, Kuo-Chun et al. Understanding data quality in a data-driven industry context.

**Journal of Industrial Information Integration**, v. 39, p. 1–14, 2024. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100729>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GLOWALLA, Philipp. Process-driven data quality management: A critical review on the application of process modeling languages. **ACM Journal of Data and Information Quality**, v. 5, n. 3, p. 1–24, 2014.

HAFID, A. An Overview of the Transformation Towards Quality 4.0. **Proceedings**,

v. 112, n. 1, p. 1-14, 2025. DOI: 10.3390/proceedings2025112018. Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2673-4591/112/1/18>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

HUANG, C.; EL-KASSAS, S.; SINGH, M. Unfolding the Impact of Quality 4.0

Practices on Industry 4.0 Technologies and Circular Economy Practices. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 1–23, 2022. . Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15495>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

ISHIKAWA, K. **Controle de qualidade total: à maneira japonesa**. Rio de Janeiro: Campus, 1993.

JURAN, J. M. **Controle da qualidade: componentes básicos da função qualidade**. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

JURAN, J. M. **Juran's Quality Handbook**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1992.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final report of the Industrie**, v. 4, n. 0, 2013. Disponível em: <[https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final\\_report\\_\\_Industrie\\_4.0\\_accessible.pdf](https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2025.

KUMAH, A. et al. Cause-and-Effect (Fishbone) Diagram: A Tool for Generating and Organizing Quality Improvement Ideas. **Global Journal on Quality and Safety in Healthcare**, v. 7, n. 2, p. 85-87, 2024. . Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11077513/>>. Acesso em: 16 nov. 2025.

KUMAR, R.; RANI, S.; AL AWADH, M. Exploring the Application Sphere of the Internet of Things in Industry 4.0: A Review, Bibliometric and Content Analysis. **Sensors**, v. 22, n. 11, p. 4276, 2022. . Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4276>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

LIKER, Jeffrey K.; MEIER, David. **The Toyota Way Fieldbook: A Practical Guide for Implementing Toyota's 4Ps**. New York; London: McGraw-Hill, 2006

LIZARDO, C. RIBEIRO, P. **A Importância da Gestão da Qualidade e Aplicação das suas Ferramentas na Logística com vista a Satisfação dos Clientes**. Cabo Verde, 2020. 3 p.

MACHINEMETRICS. **Manual Data Collection: Manufacturing's Biggest Problem**. 2022. Disponível em: <https://www.machinemetrics.com/blog/manual-data-collection>. Disponível em: <<https://www.machinemetrics.com/blog/manual-data-collection>>. Acesso em: 11 nov. 2025.

MAKHMAUDAH, S. et al. Implementation of Digitalization of Daily Production Report in Manufacturing Industry to Improve Data Efficiency and Accuracy. **International Journal of Research and Innovation in Social Science**, v. 9, n. 1, p. 2949-2956, 2025. . Disponível em: <<https://rsisinternational.org/journals/ijriss/Digital-Library/volume-9-issue-1/2949-2956.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

NAPOLEÃO, B. M. **PDCA**. Disponível em: <<https://ferramentasdaqualidade.org/pdca/>>. Acesso em: 22 fev. 2025.

OHNO, Taiichi. **Toyota production system. beyond large-scale production. Productivity press**, 2019.

OLIVEIRA, M. CICLO PDCA - **O Método para solução de problemas: Guia prático das 4 fases e 8 etapas do PDCA**. Amazon Digital Services LLC - KDP Print US, 2019. 26 Pg

PACANA, Andrzej; SIWIEC, Dominika. Universal model to support the quality improvement of industrial products. **Materials**, Basel, v. 14, n. 24, art. 7872, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/24/7872>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

PEÇAS, Paulo; et al. PDCA 4.0: A New Conceptual Approach for Continuous Improvement in the Industry 4.0 Paradigm. **Applied Sciences**, v. 11, n. 16, p. 1-18, 2021. DOI: 10.3390/app11167671. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7671>>. Acesso em: 21 nov. 2025

PEREZ, V. V.; et al. Análise do uso das sete ferramentas estatísticas da qualidade em um processo produtivo. **Revista Científica FEPI**, v. 3, n. 1, p. 112-120, 2016. Disponível em: <<http://revista.fepi.br/revista/index.php/revista/article/viewFile/502/374>>

PRASHAR, A. **Adopting PDCA (Plan-Do-Check-Act) cycle for energy optimization in energyintensiveSMEs**. Journal Of Cleaner Production, v. 145, p.277-293, 2017.

ROTHER, M. **Toyota Kata: Managing People for Improvement, Adaptiveness and Superior Results**. New York: McGraw Hill. 2010.

SANG, G. M.; XU, L.; DE VRIEZE, P. A Predictive Maintenance Model for Flexible Manufacturing in the Context of Industry 4.0. **Frontiers in Big Data**, v. 4, p. 1-19, 2021. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/big-data/articles/10.3389/fdata.2021.663466/full>>. Acesso em: 5 jun. 2025.

SIMAS, Gustavo. **O ciclo de análise de dados: desde a definição de indicadores até a tomada de decisões (e feedback)**. Tudo em Símãs (Medium), 10 jan. 2022. Disponível em: <<https://tudoemsimas.medium.com/o-ciclo-de-análise-de-dados-65f40acc401e>>. Acesso em: 20 nov. 2025.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SMITH, W. A. Accuracy of Manual Entries in Data-Collection Devices. **Journal of Applied Psychology**, vol. 51, no. 4, 1967. <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6075581/>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

SOARES, Vitor. Diagrama de Ishikawa: **o que é, para que serve e como usar**. NA Prática, 29 set. 2025. Disponível em: <https://napratica.org.br/noticias/diagrama-de-ishikawa>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SYSTEMA. **Manufacturing Data Collection: An Evolutionary Process**. 2025. Disponível em: <<https://www.systema.com/digital-transformation/data-collection>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

TAGARAM, S. D.; CHEN, C. **Quality Tools and Techniques (Fishbone Diagram, Pareto Chart, Process Map)**. StatPearls Publishing, 2024. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553014/>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

TERZONI. Diagrama de Ishikawa e Gráfico de Pareto. LeanBlog, 2018. Disponível Em: <<https://terzoni.com.br/leanblog/diagrama-ishikawa-e-grafico-de-pareto/>>. Acesso em: 21 nov. 2025.

VERA, M. et al. Improving a Manufacturing Process Using the 8Ds Method: A Case Study in a Manufacturing Company. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2433-2447, 2020.

WERKEMA, Maria Cristina – **Ferramentas Estatísticas Básicas para o Gerenciamento de Processos**. Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1995.

WOLNIAK, R.; TOMECKI, M. The usage of PDCA cycle in Industry 4.0 conditions. **Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Organizacja i Zarządzanie**, n. 210, p. 777-790, 2024.