

FACULDADE DE TECNOLOGIA ASSESSORITEC
DEPARTAMENTO DE CURSOS SUPERIORES
TECNOLOGIA EM GESTÃO DA QUALIDADE

ANDREY PEREIRA

APLICAÇÃO DE PDCA E FERRAMENTAS ESPECÍFICAS DA QUALIDADE EM
UM SETOR DE FUNDIÇÃO.

JOINVILLE

2025

ANDREY PEREIRA

**APLICAÇÃO DE PDCA E FERRAMENTAS ESPECÍFICAS DA QUALIDADE EM
UM SETOR DE FUNDIÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Cursos Superiores da Faculdade de
Tecnologia Assessoritec como requisito para a obtenção
do grau de Tecnólogo em Gestão da Qualidade.

Orientador: Prof. Jean Burgos

JOINVILLE

2025

ANDREY PEREIRA

**APLICAÇÃO DE PDCA E FERRAMENTAS ESPECÍFICAS DA QUALIDADE EM
UM SETOR DE FUNDIÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Cursos Superiores da Faculdade de Tecnologia Assessoritec como requisito para a obtenção do grau de Tecnólogo em Gestão da Qualidade.

Joinville, 23 de julho de 2025.

Prof. Jean Burgos (Orientador)
Faculdade de Tecnologia Assessoritec (FTA)

Prof. Me. Leiliani Petri Marques
Faculdade de Tecnologia Assessoritec (FTA)

Prof. Me Vilmar da Silva
Faculdade de Tecnologia Assessoritec (FTA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada. Sem a Sua presença constante, nada disso teria sido possível. Aos meus pais, minha eterna gratidão. Por todo o amor, apoio, incentivo e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que duvidei das minhas próprias capacidades. Cada conquista minha é, também, de vocês.

Agradeço, ainda, à instituição Assessoritec, por todo o suporte oferecido durante o curso, pela qualidade do ensino e pela dedicação dos profissionais envolvidos, que foram fundamentais na minha formação. A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A crescente demanda por eficiência e competitividade tem impulsionado empresas a adotarem abordagens estruturadas para controle de perdas e aumento da produtividade. Este trabalho teve como objetivo principal otimizar a disponibilidade de uma linha de produção de uma empresa de fundição, utilizando a metodologia PDCA, ferramentas da qualidade e tecnologia de monitoramento embarcada. Para isso, foi instalado um dispositivo IoT para coletar dados em tempo real sobre o tempo de ciclo da máquina. Os dados coletados permitiram calcular a disponibilidade da máquina e identificar paradas de produção a partir de um critério pré-definido. Foram aplicadas ferramentas como o Diagrama de Ishikawa e o Controle Estatístico de Processo (CEP) para identificação das causas principais das paradas e avaliação da estabilidade do processo. A partir dos resultados, foram propostas ações corretivas estruturadas, visando o aumento de disponibilidade da máquina. O estudo demonstrou que a combinação de dados de processo, tecnologia de baixo custo e metodologias de qualidade é capaz de gerar elevado impacto produtivo.

Palavras-chave: Disponibilidade de máquina, PDCA, IoT.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

CEP – Controle Estatístico de Processo

IoT – Internet das Coisas (*Internet of Things*)

LIC – Limite Inferior de Controle

LSC – Limite Superior de Controle

mR – Amplitude Móvel

OEE – Eficiência Global do Equipamento (*Overall Equipment Effectiveness*)

PDCA – Planejar, Executar, Verificar, Agir (*Plan, Do, Check, Act*)

TPM – Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance*)

WFO – World Foundry Organization

$\bar{X}$ -R – Gráfico de Média e Amplitude

XmR – Gráfico de Valor Individual e Amplitude Móvel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Ishikawa.	18
Figura 2 - Histograma comparativo de produção.....	24
Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo.	25
Figura 4 - Dispositivo IoT de coleta de dados instalado.	27
Figura 5 - Gráfico de dados de produção gerado na plataforma ThingSpeak.	28
Figura 6 – Gráfico de tempos de ciclo de produção.	34
Figura 7 - Diagrama de Dispersão - Disponibilidade x Produção Aprovada	37
Figura 8 – Distribuição das causas de parada por quantidade de ocorrência.	47
Figura 9 – Distribuição das causas de parada por tempo total de parada.	47
Figura 10 – Diagrama de Ishikawa com as principais causas de parada de produção.	49

SUMÁRIO

1. OBJETIVOS	10
1.1 OBJETIVO GERAL	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. INTRODUÇÃO	11
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 FUNDIÇÃO E EFICIÊNCIA OPERACIONAL	14
3.2 INDICADORES DE DESEMPENHO: OEE E DISPONIBILIDADE	15
3.3 CICLO PDCA (PLAN, DO, CHECK, ACT).....	16
3.4 FERRAMENTAS DA QUALIDADE.....	17
3.4.1 Diagrama de Ishikawa	17
3.4.2 Controle Estatístico de Processo (CEP)	18
3.4.3 Folha de Verificação	19
3.4.4 Histograma	19
3.4.5 Fluxograma.....	20
3.6 TECNOLOGIAS EMBARCADAS E MONITORAMENTO REMOTO	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 AMBIENTE DE ESTUDO.....	23
4.2 DISPOSITIVO DE COLETA DE DADOS	25
4.3 INTERFACE DE COLETA (THINGSPEAK)	27
4.4 COLETA E CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS	29
4.5 ANÁLISE DAS CAUSAS COM DIAGRAMA DE ISHIKAWA.....	29
4.6 APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP)	30
4.7 PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MELHORIA	30
5 RESULTADOS.....	32
5.1 DADOS COLETADOS.....	32

5.1.1 Volume de Registros e Período de Monitoramento	32
5.1.2 Tempo Médio de Ciclo.....	32
5.1.3 Disponibilidade da Máquina	34
5.2 ANÁLISE DOS DADOS	37
5.2.1 Gráficos de CEP (Controle Estatístico de Processo).....	37
5.2.2 Classificação das Causas de Parada.....	46
5.2.3 Estudo com Diagrama de Ishikawa.....	48
5.2.4 Propostas de Melhorias e Estimativa de Resultados.....	49
6 CONCLUSÕES.....	52
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	55

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar metodologias de melhoria contínua, ferramentas da qualidade e tecnologia embarcada para avaliar a disponibilidade de linha de produção em empresa de fundição, identificando os fatores que possam impactar esse indicador, propondo ações de melhoria que possam otimizar a sua capacidade produtiva.

Este trabalho adota a estrutura do ciclo PDCA como base metodológica, utilizando-o de forma adaptada à realidade de um projeto de diagnóstico. Assim, cada etapa da pesquisa foi orientada por uma fase do ciclo, desde a identificação do problema até a formulação de propostas de solução.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorar o processo produtivo por meio de um dispositivo de coleta automatizada de dados;
- Coletar e organizar dados reais sobre tempos de produção e indisponibilidade da máquina ao longo de um período representativo;
- Identificar e classificar os principais fatores que reduzem a disponibilidade da máquina com base em dados reais da operação;
- Aplicar o Diagrama de Ishikawa para análise das causas raiz associadas à indisponibilidade;
- Utilizar ferramentas do Controle Estatístico de Processo (CEP) para avaliar a estabilidade e os desvios do processo ao longo do tempo;
- Propor e estruturar ações corretivas baseadas em boas práticas operacionais, padronização e manutenção preventiva;

2. INTRODUÇÃO

A competitividade no setor industrial exige das empresas ações contínuas voltadas à excelência operacional, redução de perdas e maximização da eficiência. No contexto das fundições, em especial, a complexidade dos processos e a interdependência entre equipamentos críticos tornam o controle da disponibilidade dos ativos produtivos um fator determinante para o desempenho e a sustentabilidade do negócio (NAKAJIMA, 1988).

Segundo o World Foundry Organization (WFO), fundições apresentam, em média, eficiência global (OEE) entre 60% e 75%, com disponibilidade variando entre 70% e 85%, dependendo do grau de automação e do tipo de processo (WFO, 2022). No Brasil, essa variação pode ser ainda mais acentuada, considerando os desafios locais em infraestrutura, manutenção e qualificação de mão de obra (ABIFA, 2023).

Nesse contexto, a indisponibilidade de máquinas, especialmente em linhas críticas como as de moldagem, afeta diretamente a capacidade de atendimento da produção, eleva o lead time e gera impactos financeiros significativos. A falta de controle em tempo real, aliada à ausência de dados confiáveis sobre os tempos de parada, dificulta a tomada de decisões e impede a aplicação efetiva de ações corretivas (MARTINS; LAUGENI, 2015).

Para enfrentar esse desafio, este trabalho propõe uma abordagem estruturada baseada no ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), na aplicação de ferramentas da qualidade e no uso de tecnologia embarcada para coleta de dados. Um dispositivo eletrônico baseado em microcontrolador IoT (NodeMCU ESP8266) foi instalado na linha de produção A, permitindo o registro automatizado dos tempos de ciclo e, por consequência, a inferência do indicador de disponibilidade da máquina.

Esses dados foram enviados em tempo real para a nuvem por meio da plataforma ThingSpeak, integrando a coleta à análise estatística e fornecendo subsídios para diagnósticos mais precisos e intervenções fundamentadas em evidências. A metodologia contempla ainda a classificação das causas das paradas com auxílio do Diagrama de Ishikawa, o monitoramento por gráficos de controle estatístico, e a construção de uma simulação computacional da linha de produção, permitindo projetar o impacto das ações de melhoria sobre a produção total da linha.

A empresa estudada está localizada no sul do Brasil e atua na produção de peças fundidas em ferro cinzento, nodular e branco. Com três linhas de produção, optou-se por focar neste trabalho a linha de produção que identificaremos como “Linha A”, por se tratar da mais automatizada e representativa em termos de volume. Dados históricos e observações em campo apontaram que a disponibilidade da máquina de moldagem era uma das principais restrições da linha, comprometendo o ritmo da fundição e forçando realocações constantes na programação.

O objetivo deste trabalho, portanto, é fornecer uma proposta prática e baseada em dados reais para aumentar a disponibilidade da máquina de moldagem, promovendo ganhos diretos na eficiência da linha, reduzindo perdas operacionais e fortalecendo a cultura de melhoria contínua na organização.

2.1 PROBLEMA

O setor de fundição tem evidenciado a importância da disponibilidade dos equipamentos como fator crítico para a produtividade. Na empresa estudada localizada no sul do Brasil e especializada na produção de peças fundidas em ferro, observou-se que uma determinada máquina de moldagem da **Linha A** apresentava baixa disponibilidade operacional, comprometendo o ritmo de produção, gerando atrasos na programação e aumentando os custos por peça produzida. A ausência de dados confiáveis em tempo real sobre os tempos de parada dificultava a identificação precisa das causas e a implementação de ações corretivas eficazes. Diante disso, o problema de pesquisa que norteia este trabalho é: **Como aumentar a disponibilidade da máquina de moldagem por meio da aplicação de ferramentas da qualidade e ciclo PDCA.**

2.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa para a realização deste estudo está na necessidade de **melhorar a eficiência operacional** da linha de produção, reduzindo perdas e aumentando a capacidade produtiva sem a necessidade de grandes investimentos em novos equipamentos. A escolha pela aplicação do ciclo PDCA, aliado a ferramentas da qualidade e à tecnologia IoT, justifica-se por sua viabilidade **técnica e econômica.**

2.3 RELEVÂNCIA

A relevância deste trabalho está na aplicação prática e integrada de **ferramentas da qualidade** e da **metodologia PDCA** como instrumentos estratégicos para a melhoria da eficiência operacional em ambientes industriais. Em um cenário onde a competitividade exige decisões baseadas em dados e ações sistemáticas de melhoria contínua, o uso do ciclo PDCA (Planejar, Executar, Verificar, Agir) se mostra essencial para estruturar o diagnóstico, a análise e a implementação de soluções eficazes.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 FUNDIÇÃO E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

O processo de fundição é uma das técnicas de fabricação mais antigas e amplamente utilizadas na indústria de transformação. Consiste essencialmente em fundir um metal e vertê-lo em moldes que dão forma ao produto desejado. Apesar de tradicional, o processo é altamente complexo e envolve múltiplas variáveis críticas que influenciam diretamente a qualidade final e a produtividade (PINTO et al., 2020).

A eficiência operacional em fundições é um desafio constante, principalmente devido à elevada variabilidade dos materiais (sucata metálica, areia, aditivos), das condições de operação (temperatura, umidade, composição do metal) e do comportamento humano (preparação de moldes, controle de processo e operação de máquinas). Além disso, grande parte das fundições brasileiras ainda apresenta um baixo nível de automação, o que agrava a dificuldade de monitoramento e controle em tempo real (ABIFA, 2023).

Segundo o Relatório Global de Fundição da World Foundry Organization (2022), os maiores desafios enfrentados por fundições no mundo são:

- Redução de custos operacionais;
- Aumento da eficiência produtiva;
- Implementação de soluções tecnológicas integradas;
- Melhoria da rastreabilidade e da qualidade;
- Redução de tempos de parada e perdas por setup.

No Brasil, cerca de 70% das fundições são de pequeno e médio porte, e operam com índices de eficiência global (OEE) abaixo de 70%, sendo que a disponibilidade das máquinas representa frequentemente a maior fonte de perdas (ABIFA, 2023). Isso decorre, principalmente, da ausência de um controle sistematizado dos tempos de máquina parada, setups não otimizados e falhas técnicas recorrentes em equipamentos antigos ou mal gerenciados.

Esses fatores tornam urgente a adoção de metodologias estruturadas de melhoria contínua, bem como a incorporação de tecnologias embarcadas de monitoramento que permitam coletar dados confiáveis do processo em tempo real.

Neste contexto, o presente trabalho propõe-se a contribuir com uma abordagem prática para otimização da disponibilidade da máquina de moldagem da Linha A, utilizando conceitos consolidados da engenharia de produção, da estatística industrial e da simulação computacional.

3.2 INDICADORES DE DESEMPENHO: OEE E DISPONIBILIDADE

A medição da performance de equipamentos industriais é fundamental para a identificação de gargalos produtivos e priorização de ações de melhoria. Um dos indicadores mais utilizados para esse fim é o OEE (Overall Equipment Effectiveness), ou Eficiência Global do Equipamento. Esse índice é resultado da multiplicação de três fatores principais: Disponibilidade, Performance e Qualidade (NAKAJIMA, 1988). A equação do OEE é representada por:

$$\text{OEE (\%)} = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade}$$

Dentre esses três pilares, a Disponibilidade representa a proporção do tempo em que o equipamento está efetivamente em operação, em relação ao tempo total planejado para a produção. Sua fórmula é dada por:

$$\text{Disponibilidade (\%)} = (\text{Tempo de Operação Real} / \text{Tempo Planejado}) \times 100$$

A indisponibilidade, por sua vez, pode ser atribuída a fatores como paradas técnicas, setups, esperas por materiais, ausência de operador, falhas de comunicação entre setores ou até mesmo desvios organizacionais (SLACK et al., 2009). Portanto, medir e melhorar a disponibilidade é uma estratégia central para qualquer esforço de aumento de produtividade.

Estudos conduzidos por Martins e Laugeni (2015) indicam que melhorias de até 20% no OEE podem ser alcançadas apenas com a redução sistemática de paradas improdutivas, sem necessidade de aquisição de novos equipamentos. Isso é

especialmente relevante para pequenas e médias empresas, que frequentemente enfrentam restrições orçamentárias.

No contexto da fundição, o monitoramento da disponibilidade de equipamentos como máquinas de moldagem, fornos de fusão e sistemas de alimentação é fundamental, dado que tais recursos operam como gargalos naturais do processo. A ausência de dados confiáveis, aliada à falta de indicadores visuais e digitalização, resulta em uma subutilização crônica desses ativos produtivos.

3.3 CICLO PDCA (PLAN, DO, CHECK, ACT)

O Ciclo PDCA, também conhecido como ciclo de Deming ou ciclo de Shewhart, é uma ferramenta fundamental para a gestão da qualidade e melhoria contínua em ambientes industriais. A metodologia foi popularizada por W. Edwards Deming a partir dos anos 1950 e se baseia na premissa de que a melhoria de processos deve ocorrer de forma sistemática, cíclica e sustentada (PALADINI, 2012).

Essa metodologia é amplamente utilizada em indústrias de manufatura por sua versatilidade e baixo custo de implementação, permitindo que equipes de produção, manutenção e qualidade atuem de forma integrada (CAMPOS, 2004). O PDCA é estruturado em quatro fases:

- Plan (Planejar): identificação do problema, análise das causas, definição de metas e planejamento das ações corretivas;
- Do (Executar): implementação das ações planejadas em ambiente real ou piloto;
- Check (Verificar): medição dos resultados obtidos, comparação com metas e verificação de desvios;
- Act (Agir): padronização das melhorias quando bem-sucedidas, ou revisão do plano em caso de falhas.

O uso do PDCA proporciona, assim, uma base lógica e consistente para o desenvolvimento de soluções operacionais alinhadas à realidade da empresa, incentivando a participação da equipe de chão de fábrica e promovendo a padronização de processos.

3.4 FERRAMENTAS DA QUALIDADE

3.4.1 Diagrama de Ishikawa

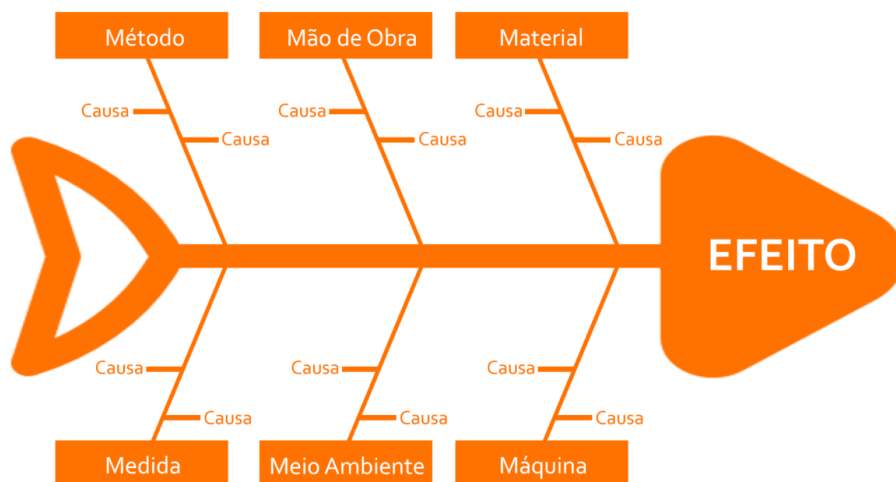
As ferramentas da qualidade são instrumentos utilizados para identificar, analisar e solucionar problemas nos processos produtivos. Entre elas, destaca-se o Diagrama de Causa e Efeito, também conhecido como Diagrama de Ishikawa ou Espinha de Peixe, desenvolvido por Kaoru Ishikawa na década de 1960 (ISHIKAWA, 1986).

Essa ferramenta, é usada para mapear, de forma estruturada, as possíveis causas de um problema, agrupando-as em categorias principais. O modelo clássico, apresentado na Figura 1, utiliza os 6Ms:

- Máquina: falhas, desgaste, limitações técnicas;
- Método: ausência de padrões, erros operacionais;
- Mão de obra: falta de treinamento, má comunicação;
- Material: insumos fora de especificação, falta de insumos;
- Meio ambiente: condições inadequadas de trabalho;
- Medição: erros de registro, falta de indicadores.

O Diagrama de Ishikawa é especialmente útil em projetos de melhoria de disponibilidade, pois permite visualizar de maneira clara as causas que contribuem para paradas recorrentes de máquina. Em uma fundição, onde os processos envolvem variáveis metalúrgicas e operacionais críticas, essa análise ajuda a priorizar ações corretivas com base em causas reais e não apenas percepções subjetivas (MIGUEL, 2012).

Figura 1 - Diagrama de Ishikawa.



Fonte: Google imagens (2025). Disponível em: <https://napratica.org.br/diagrama-de-ishikawa/>

3.4.2 Controle Estatístico de Processo (CEP)

O Controle Estatístico de Processo (CEP) é uma das ferramentas mais robustas e tradicionais da engenharia de produção para o monitoramento contínuo de variáveis de processo. Seu objetivo é identificar, ao longo do tempo, a presença de instabilidades ou anomalias em um sistema, permitindo intervenções mais precisas e eficazes (MONTGOMERY, 2009).

O CEP se baseia na construção de gráficos de controle, que representam estatisticamente a variação natural de um processo. Quando o processo se mantém dentro dos limites de controle estatísticos, considera-se que está sob controle. Já a presença de pontos fora desses limites ou padrões sistemáticos indica a ação de causas especiais, que devem ser investigadas. Os gráficos mais comuns incluem:

- Gráficos $\bar{X}$ -R (médias e amplitudes por subgrupos);
- Gráficos de valores individuais (X) e amplitude móvel (mR) – ideais quando os dados são coletados um a um, como neste projeto;
- Gráficos p, np, c, u, voltados para controle de atributos (defeitos, peças rejeitadas, etc.).

O uso de CEP também fortalece a confiabilidade do estudo ao aplicar métodos estatísticos consolidados e validados academicamente (COSTA NETO, 2011).

3.4.3 Folha de Verificação

A folha de verificação, também conhecida como checklist ou lista de checagem, é uma ferramenta da qualidade amplamente utilizada na coleta estruturada de dados. Seu principal objetivo é facilitar o registro e a contagem de ocorrências de eventos, falhas ou defeitos, permitindo um levantamento inicial confiável e sistemático de dados do processo (MIGUEL, 2012).

Ela é particularmente eficaz em fases iniciais de investigação de problemas, pois permite identificar a frequência e o padrão de determinados eventos. Por exemplo, pode-se utilizá-la para registrar todas as paradas de máquina, classificadas por tipo, turno ou operador, formando uma base sólida para o Diagrama de Pareto ou o Diagrama de Ishikawa. A folha de verificação apresenta ainda as seguintes vantagens:

- É de fácil elaboração e aplicação, inclusive em ambientes de chão de fábrica;
- Ajuda a organizar os dados para análises posteriores;
- Serve como evidência objetiva para tomada de decisão.

Mesmo com o avanço dos sistemas digitais, essa ferramenta continua sendo muito útil, principalmente quando associada a observações diretas de campo ou quando aplicada por operadores treinados na identificação das causas.

3.4.4 Histograma

O histograma é uma ferramenta gráfica fundamental para a visualização da distribuição de dados contínuos, permitindo verificar a forma (simétrica, assimétrica), a dispersão e a tendência central de um processo. Ele se baseia na construção de barras verticais, agrupando os dados em intervalos (ou classes) e representando a frequência de ocorrência em cada classe (MONTGOMERY, 2009).

O histograma é muito utilizado na indústria para avaliar a conformidade dos processos com os limites de especificação técnica, além de ser um recurso eficaz para identificar desvios, assimetrias ou agrupamentos fora do padrão esperado.

A escolha do número de classes deve equilibrar legibilidade e precisão. Uma das fórmulas mais conhecidas para essa definição é a Regra de Sturges:

$$K = 1 + 3,3 \cdot \log_{10}(n)$$

Onde K é o número de classes e n é o número de observações. Esta regra, tradicionalmente utilizada em estatística descritiva, é recomendada para conjuntos de dados com distribuição próxima da normalidade e visa garantir equilíbrio entre detalhamento e clareza gráfica (STURGES, 1926).

3.4.5 Fluxograma

O fluxograma é uma ferramenta gráfica que representa a sequência lógica de etapas de um processo. Cada etapa é representada por um símbolo padronizado como retângulos para atividades, losangos para decisões e setas para o fluxo, o que torna a ferramenta altamente visual e intuitiva (CAMPOS, 2004). Sua aplicação visa:

- Mapear processos com clareza;
- Identificar redundâncias e gargalos;
- Facilitar treinamentos e comunicação entre áreas;
- Servir de base para padronização ou redesenho de processos.

De acordo com Slack et al. (2009), o fluxograma é uma ferramenta essencial na gestão da produção, pois permite que a organização visualize o fluxo real dos processos e tome decisões com base em dados estruturados.

3.4.6 Diagrama de Pareto

O Diagrama de Pareto é uma ferramenta de priorização, que utiliza o princípio de que poucas causas geram a maior parte dos efeitos (regra 80/20). Em termos práticos, o gráfico permite identificar os problemas mais impactantes de um processo e guiar ações corretivas com maior retorno (COSTA NETO, 2011).

É representado por um gráfico de barras em ordem decrescente de frequência ou impacto, com uma linha acumulada que mostra o percentual total. As categorias mais à esquerda representam os fatores que merecem atenção prioritária.

Sua principal contribuição é permitir a focalização das melhorias, evitando dispersão de esforços. Ele também é frequentemente utilizado após a coleta com folha de verificação.

3.4.7 Diagrama de Dispersão

O Diagrama de Dispersão (ou gráfico de dispersão) é uma ferramenta estatística usada para verificar se há correlação entre duas variáveis quantitativas. Por meio da plotagem de pontos em um plano cartesiano, é possível visualizar a existência e o tipo de relação entre os dados, se positiva, negativa ou inexistente (MONTGOMERY, 2009). O Diagrama de Dispersão é particularmente útil para:

- Identificar causas potenciais de variações;
- Confirmar hipóteses levantadas em outras análises;
- Explorar comportamentos anômalos (outliers).

O Diagrama de Dispersão também pode embasar análises mais avançadas, como regressão linear ou coeficiente de correlação de Pearson.

3.6 TECNOLOGIAS EMBARCADAS E MONITORAMENTO REMOTO

A incorporação de tecnologias embarcadas e sistemas de monitoramento remoto tem revolucionado a forma como os dados industriais são coletados, armazenados e analisados. Essa transformação é impulsionada pelo avanço da Indústria 4.0, que integra tecnologias como Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, sensoriamento inteligente, automação descentralizada e análise de dados em tempo real (KAGERMANN et al., 2013).

No ambiente fabril, a aplicação de dispositivos microcontrolados — como ESP8266, Arduino, Raspberry Pi, entre outros — permite transformar máquinas convencionais em ativos inteligentes capazes de gerar dados operacionais

continuamente. Essa abordagem torna possível obter informações críticas como tempo de ciclo, número de operações, eventos de parada, consumo de energia, entre outros, sem necessidade de grandes investimentos em automação pesada (ALMEIDA et al., 2022).

Segundo a McKinsey & Company (2021), empresas que adotaram soluções de monitoramento remoto e análise preditiva observaram uma redução média de 25% no tempo de inatividade de máquinas, além de melhoria de até 30% na capacidade de planejamento de manutenção. Ainda conforme a pesquisa, as tecnologias de IoT tendem a se expandir rapidamente no setor industrial até 2030, principalmente entre pequenas e médias empresas que buscam alto impacto com baixo custo de implantação.

Além disso, esse tipo de solução promove um ambiente de aprendizado e transformação digital dentro da empresa, incentivando futuras aplicações como monitoramento de fornos, controle térmico, rastreabilidade de peças e manutenção preditiva (GIL et al., 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a realização que é classificado como um estudo de ambiente industrial, descrevendo o ambiente de pesquisa, os equipamentos utilizados, os dados coletados e as ferramentas analíticas aplicadas.

Neste trabalho, a disponibilidade da máquina de moldagem da Linha A será monitorada a partir de um dispositivo eletrônico que identifica os momentos de inatividade com base no intervalo entre ciclos de produção. Serão considerados como eventos de parada aqueles períodos em que o tempo entre ciclos ultrapassa 60 segundos. A partir dessa métrica, será possível calcular a disponibilidade de produção e identificar variações críticas, fornecendo subsídios objetivos para ações de correção, permitindo quantificar o impacto que a melhoria desse indicador pode gerar no volume de produção da linha.

A metodologia adotada neste trabalho está alinhada com o ciclo PDCA utilizado como base para guiar as etapas do diagnóstico.

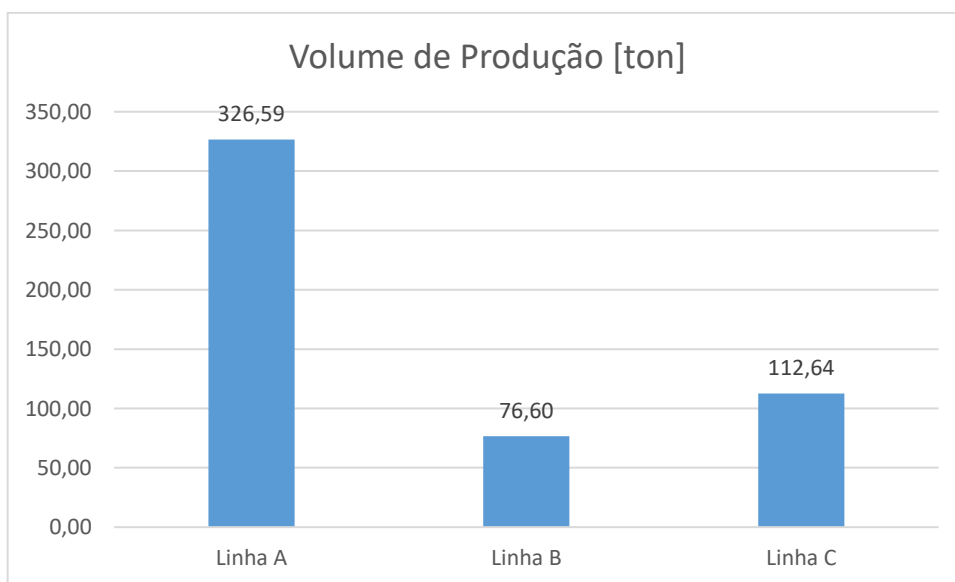
- A fase “Plan” corresponde à verificação do problema de disponibilidade, a partir da observação da operação e da percepção dos gestores.
- A fase “Do” envolve o desenvolvimento e instalação de um dispositivo IoT, que viabilizou a coleta automática de dados de ciclo.
- Na etapa “Check” foi realizada a análise dos dados, com cálculo da disponibilidade, aplicação das ferramentas da qualidade.
- Por fim, na fase “Act” foram propostas ações corretivas e estimados os ganhos potenciais na produtividade da máquina.

4.1 AMBIENTE DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada em uma empresa do setor de fundição, localizada na região sul do Brasil. A organização atua na fabricação de peças técnicas em ferro fundido cinzento, nodular e branco, atendendo diversos segmentos industriais. A planta produtiva é composta por três linhas principais, sendo o presente estudo centrado na Linha A, por sua representatividade em volume de produção.

A Figura 2 apresenta o volume de produção em toneladas durante o período avaliado de 55 dias, demonstrando a sua importância no objetivo de aumentar a disponibilidade de máquina, permitindo assim um aumento na capacidade produtiva.

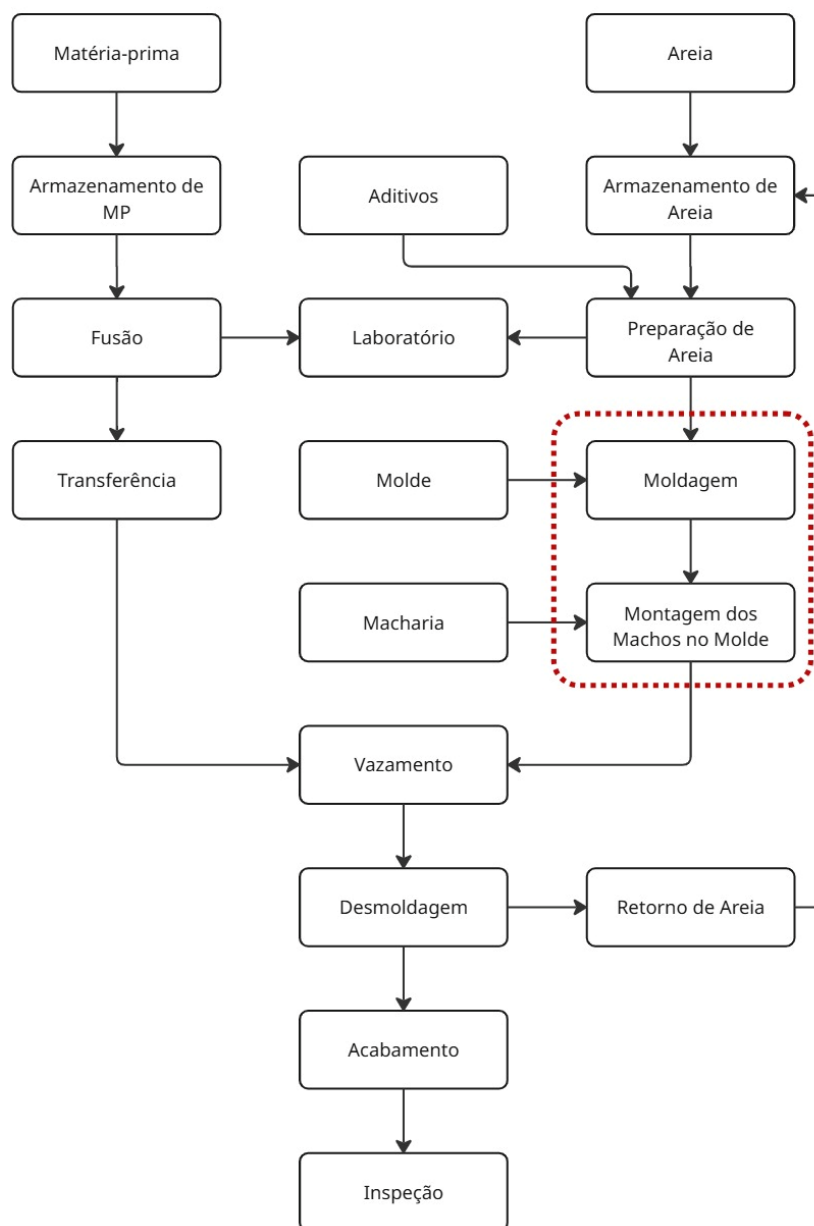
Figura 2 - Histograma comparativo de produção.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O fluxograma do processo produtivo desta empresa é apresentado na Figura 3. As operações destacadas em vermelho são executadas na Linha A, que é equipada com uma máquina de moldagem automática, considerada o principal gargalo da linha, uma vez que define o ritmo da produção e condiciona a programação de vazamentos e desmoldagem. O histórico da empresa indica dificuldades em manter a disponibilidade dessa máquina, gerando atrasos no atendimento à programação e aumento do custo por peça produzida.

Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 DISPOSITIVO DE COLETA DE DADOS

Com o objetivo de obter dados confiáveis e contínuos sobre a disponibilidade da máquina de moldagem da Linha A, foi desenvolvido e instalado um dispositivo eletrônico de monitoramento em tempo real, utilizando tecnologia de baixo custo baseada em IoT (Internet das Coisas). O equipamento permitiu registrar

automaticamente os intervalos entre ciclos de produção, possibilitando a identificação de paradas operacionais com base em critérios previamente estabelecidos.

O dispositivo foi projetado para ser não invasivo, de fácil instalação e com capacidade de comunicação com a internet. Ele foi fixado fisicamente ao lado da máquina de moldagem e configurado para capturar os momentos de ciclo ativo por meio de um sensor físico de acionamento mecânico. A cada novo ciclo, o sensor era acionado por um movimento da máquina, o que permitia ao dispositivo calcular o tempo entre eventos consecutivos.

Os principais componentes utilizados no Dispositivo IoT apresentado na Figura 4 foram:

- Placa NodeMCU ESP8266: microcontrolador com conectividade Wi-Fi embutida, programável em linguagem Arduino.
- Sensor de contato (chave fim de curso): responsável por detectar o início de cada ciclo de produção.
- Fonte de alimentação externa 5V: utilizada para garantir operação contínua do dispositivo.
- Cabo micro-USB + suporte físico: para conexão elétrica e fixação segura à máquina.
- Módulo de transmissão de dados via Wi-Fi: nativamente integrado à placa NodeMCU.

Figura 4 - Dispositivo IoT de coleta de dados instalado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O dispositivo opera com a seguinte lógica:

- Ao detectar um acionamento da chave fim de curso (indicando início de ciclo), o dispositivo envia um registro para o servidor.
- O servidor registra o horário de envio do registro, atribui um número sequencial para ele e calcula automaticamente o tempo decorrido desde o último acionamento.
- Os dados são organizados em sequência e armazenados em uma plataforma em nuvem.

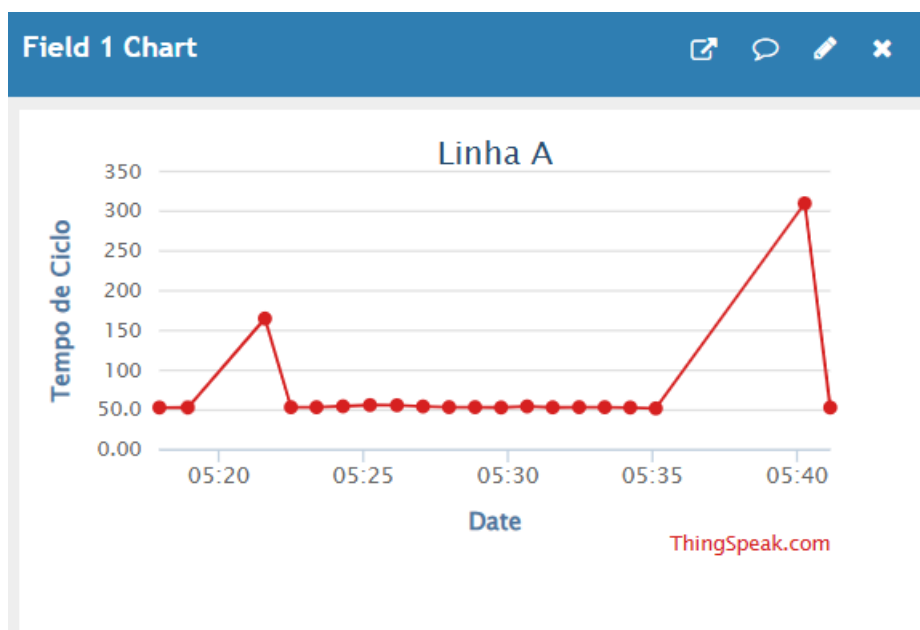
4.3 INTERFACE DE COLETA (THINGSPEAK)

Para o armazenamento, visualização e exportação dos dados, foi utilizada a plataforma ThingSpeak, uma solução baseada em nuvem que permite o envio de dados por dispositivos IoT, com suporte do ecossistema MATLAB.

Os dados são enviados em tempo real através da conexão Wi-Fi da NodeMCU para um canal específico da conta do projeto. A interface possibilitou a geração automática de gráficos, conforme apresentado na Figura 5, o qual possui as seguintes informações:

- Número sequencial dos ciclos;
- Tempo entre ciclos consecutivos;
- Identificação de cada evento.

Figura 5 - Gráfico de dados de produção gerado na plataforma ThingSpeak.



Fonte: Dados do autor (2025), interface ThingSpeak.

Este sistema permitiu uma coleta de dados contínua, automatizada e confiável, fornecendo a base para todas as análises estatísticas e simulações apresentadas nos tópicos a seguir.

A lógica de funcionamento do dispositivo foi programada para registrar os tempos entre ciclos consecutivos. Os dados eram então enviados automaticamente e em tempo real para a plataforma ThingSpeak, hospedada no ambiente MATLAB, possibilitando:

- Armazenamento em nuvem;
- Visualização de gráficos online;
- Exportação de dados para análise em Excel e MATLAB.

Esse sistema permitiu um monitoramento contínuo, confiável e de baixo custo, representando um avanço significativo frente ao antigo modelo baseado em registros manuais ou relatórios indiretos de produção.

4.4 COLETA E CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS

A coleta de dados foi realizada durante um período de 55 dias de operação da Linha A. Foram registrados cerca de 22.000 eventos de ciclo, com suas respectivas datas e horários de ocorrência.

Os dados foram exportados em formato tabular e tratados em planilhas eletrônicas, onde foram adicionadas colunas para:

- Cálculo automático do tempo entre ciclos;
- Classificação binária do evento (produção ou parada);
- Categorização dos eventos de parada.

As categorias de parada foram definidas com base em observação direta na planta, entrevistas com operadores e histórico de manutenção:

- Falha de Equipamento;
- Setup/troca de Modelo;
- Falta de Material (inclusive ferro líquido);
- Ajuste de Processo;
- Outros (eventos atípicos ou não identificados).

Essas categorias foram validadas com o setor de produção e manutenção para garantir representatividade e fidelidade ao processo real.

4.5 ANÁLISE DAS CAUSAS COM DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Neste estudo, o Diagrama de Ishikawa foi aplicado após a coleta e categorização dos eventos de indisponibilidade identificados pelo sistema de

monitoramento. Ele serviu como base para a elaboração dos planos de ação e foi fundamental na etapa “Plan” do ciclo PDCA.

O diagrama foi estruturado com base nos 6Ms (Máquina, Método, Mão de Obra, Material, Meio Ambiente e Medição), conforme sugerido na literatura (ISHIKAWA, 1986).

O objetivo dessa análise foi identificar causas raiz para as ocorrências de parada, de modo a subsidiar a elaboração de planos de ação eficazes. A ferramenta também serviu como instrumento de comunicação visual e envolvimento da equipe, sendo validada em conjunto com os supervisores de produção.

Seu uso também foi importante para engajar os operadores e supervisores no processo de diagnóstico, valorizando o conhecimento técnico da equipe e promovendo uma cultura de melhoria participativa.

4.6 APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP)

No caso da Linha A, o CEP foi aplicado sobre os dados de tempo de ciclo extraídos do dispositivo de monitoramento. A análise se concentrou no tempo entre ciclos (em segundos), com atenção especial a valores entre 50 e 60 segundos, que foram considerados eventos de produção. Além disso, essa análise forneceu insumos importantes para a fase "Check" do PDCA, ajudando a estimar a efetividade das ações corretivas propostas.

Com os dados já organizados por data e hora, optou-se pela utilização de gráficos de controle do tipo Xbarra-R utilizando agrupamento de subgrupos de 5 ciclos consecutivos. O CEP foi utilizado para:

- Verificar a estabilidade estatística dos tempos de ciclo;
- Identificar dias ou períodos com comportamento anômalo;
- Avaliar a presença de tendências ou causas especiais de variação.

4.7 PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE MELHORIA

Após a identificação e categorização das principais causas de indisponibilidade da máquina de moldagem, foi estruturado um plano de ação de melhoria com base

nas causas mais impactantes identificadas no Diagrama de Ishikawa que foram: Interrupções por falta de metal para vazamento, ordens de produção com baixa quantidade de moldes, interrupções por ausência de moldes e falhas mecânicas não tratadas preventivamente (Máquina).

As ações priorizadas foram aquelas com maior potencial de impacto sobre o tempo total de parada, de fácil implantação e que exigem menor investimento inicial. A equipe envolvida foi composta por representantes dos setores de produção, engenharia e manutenção, com grande experiência no processo produtivo e conhecimento técnico do equipamento.

5 RESULTADOS

5.1 DADOS COLETADOS

A coleta de dados foi realizada de forma contínua por meio do dispositivo instalado na máquina de moldagem da Linha A, durante um período de 55 dias. O sistema foi programado para registrar automaticamente o tempo entre cada ciclo produtivo, permitindo identificar os períodos de produção ativa e os eventos de indisponibilidade da máquina com base em um critério pré-estabelecido.

5.1.1 Volume de Registros e Período de Monitoramento

Durante o período monitorado, foram registrados 22.012 eventos de produção e parada. A Tabela 1 apresenta um resumo do volume de dados coletados:

Tabela 1 – Resumo dos dados coletados

Item	Valor
Dias monitorados	55
Total de registros	22.012
Registros de produção	20.695
Registro de paradas	1.317

Fonte: Elaborado pelo autor (2025) dados do Dispositivo IoT armazenados na plataforma ThingSpeak.

Todos os dados foram exportados da plataforma ThingSpeak e organizados em planilhas para posterior tratamento, análise estatística e modelagem.

5.1.2 Tempo Médio de Ciclo

A Tabela 2 resume os principais dados estatísticos extraídos dos 22.012 registros obtidos pelo dispositivo de monitoramento.

Tabela 2 – Estatísticas dos tempos de ciclo.

Item	Valor
Tempo mínimo	50,07 segundos
Tempo máximo	8700,00 segundos
Média	90,95 segundos
Mediana	52,67 segundos
Desvio padrão	289,33

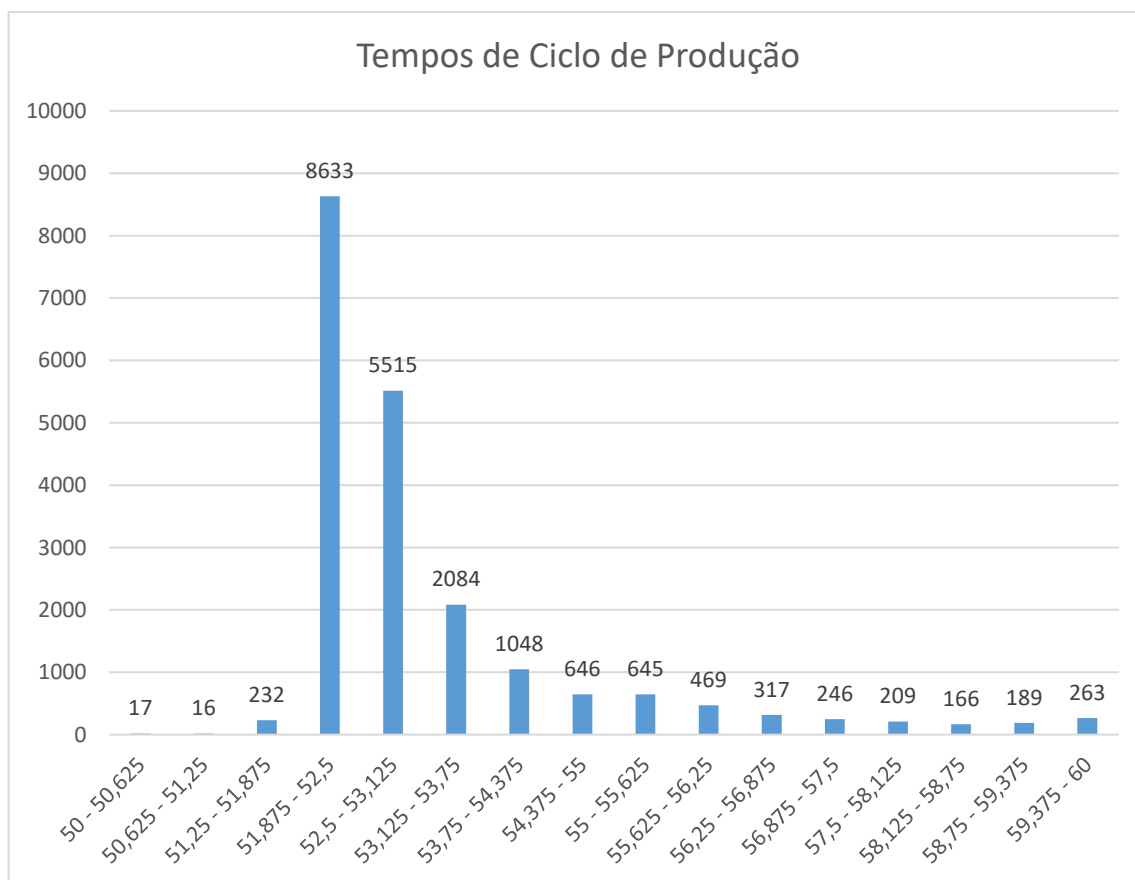
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os tempos entre ciclos de produção, excluindo os registros de parada, variaram entre 50 e 60 segundos, valor coerente com o comportamento normal da máquina, conforme validado por operadores e supervisores da empresa.

Para permitir uma visualização melhor dos dados coletados, foi aplicada a Regra de Sturges sobre os 20.695 registros de produção obtidos no estudo, a fórmula resultou em 16 classes, suficientes para gerar um Histograma que represente a dispersão dos dados sem comprometer a legibilidade ou a identificação de padrões relevantes.

A distribuição dos tempos de ciclo de produção é apresentada no histograma da Figura 6, demonstrando que a maioria dos ciclos se concentra na faixa entre 51,875 e 54,375 segundos.

Figura 6 – Gráfico de tempos de ciclo de produção.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1.3 Disponibilidade da Máquina

Com base no critério definido, tempo entre ciclos maior que 60,0 segundos representa uma parada de máquina, foi possível calcular a disponibilidade diária da máquina ao longo dos 55 dias monitorados.

A Tabela 3 apresenta uma amostra dos dados processados, contendo o total de tempo de parada por dia, o tempo útil planejado e a disponibilidade correspondente:

Tabela 3 – Amostra de cálculo de disponibilidade diária.

Data	Tempo Total Disponível	Tempo em Operação	Tempo de Parada	Disponibilidade
01/04/2025	10:06	5:06	5:00	50,6%
02/04/2025	10:11	5:52	4:19	57,6%

03/04/2025	10:09	4:24	5:45	43,4%
04/04/2025	10:17	4:56	5:21	48,0%
07/04/2025	10:18	6:03	4:15	58,7%
08/04/2025	10:11	7:20	2:51	72,1%
09/04/2025	10:06	5:04	5:02	50,2%
10/04/2025	10:06	6:56	3:10	68,7%
11/04/2025	10:04	5:15	4:49	52,2%
14/04/2025	10:02	5:15	4:47	52,4%
15/04/2025	10:37	5:22	5:14	50,6%
16/04/2025	12:07	8:04	4:03	66,6%
17/04/2025	10:13	5:47	4:26	56,6%
22/04/2025	10:27	6:56	3:31	66,4%
23/04/2025	09:30	5:43	3:47	60,2%
24/04/2025	10:05	5:13	4:52	51,8%
25/04/2025	10:11	5:06	5:05	50,1%
28/04/2025	10:19	4:34	5:45	44,3%
29/04/2025	10:42	5:49	4:53	54,4%
30/04/2025	10:05	4:45	5:20	47,2%
02/05/2025	10:17	7:16	3:01	70,7%
05/05/2025	06:59	3:05	3:53	44,2%
06/05/2025	10:16	6:13	4:03	60,6%
07/05/2025	10:12	6:19	3:53	62,0%
08/05/2025	09:42	4:50	4:52	49,9%
09/05/2025	10:03	3:33	6:30	35,4%
12/05/2025	09:59	6:28	3:31	64,8%
13/05/2025	10:01	6:14	3:47	62,3%
14/05/2025	10:05	4:06	5:59	40,7%
15/05/2025	10:20	5:59	4:21	57,9%
16/05/2025	10:05	6:17	3:48	62,3%
19/05/2025	09:42	5:44	3:58	59,2%
20/05/2025	10:12	7:30	2:42	73,5%
21/05/2025	10:01	5:04	4:57	50,6%
22/05/2025	10:39	5:51	4:48	55,0%

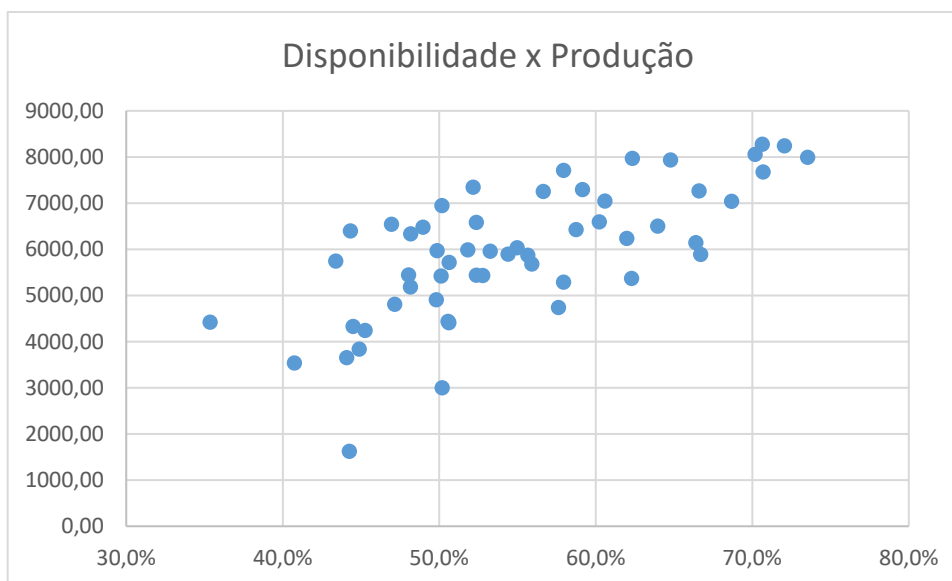
23/05/2025	09:36	6:24	3:12	66,7%
24/05/2025	09:39	5:22	4:17	55,6%
26/05/2025	09:40	6:47	2:53	70,2%
28/05/2025	09:53	4:28	5:25	45,3%
29/05/2025	10:11	5:54	4:17	57,9%
30/05/2025	11:08	4:54	6:14	44,1%
02/06/2025	10:09	7:10	2:59	70,6%
03/06/2025	10:13	5:00	5:13	49,0%
04/06/2025	10:20	4:51	5:29	46,9%
05/06/2025	10:09	5:24	4:45	53,2%
06/06/2025	10:03	4:50	5:13	48,1%
09/06/2025	10:05	4:29	5:36	44,5%
10/06/2025	09:56	4:27	5:29	44,9%
11/06/2025	10:15	5:22	4:53	52,4%
12/06/2025	10:12	6:31	3:41	63,9%
13/06/2025	10:23	5:48	4:35	55,9%
16/06/2025	09:50	5:11	4:39	52,8%
17/06/2025	09:48	4:43	5:05	48,2%
18/06/2025	09:41	4:51	4:50	50,2%
20/06/2025	10:07	5:02	5:05	49,8%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025) dados obtidos pelo Dispositivo IoT.

A disponibilidade média da máquina da Linha A durante o período foi de aproximadamente 54,9%, valor que possui boa margem para melhoria, conforme apontado pelos eventos de parada classificados nas seções seguintes.

Para validar a hipótese e que um aumento da disponibilidade da máquina resultaria em uma maior capacidade de produção, foi realizada uma correlação entre o indicador de disponibilidade de máquina e produção aprovada. O resultado apresentado na Figura 7 confirma a hipótese e reforça a importância deste estudo.

Figura 7 - Diagrama de Dispersão - Disponibilidade x Produção Aprovada



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2 ANÁLISE DOS DADOS

A partir dos dados coletados ao longo do período de monitoramento, foi possível realizar uma análise detalhada da operação da máquina de moldagem da Linha A. As análises a seguir combinam ferramentas estatísticas e da qualidade, buscando identificar padrões, causas e oportunidades de melhoria para a disponibilidade da máquina.

5.2.1 Gráficos de CEP (Controle Estatístico de Processo)

Com o objetivo de avaliar o comportamento do processo de moldagem ao longo de diferentes condições operacionais, foram aplicados gráficos de controle I (valores individuais) para seis dias distintos de produção, sendo três classificados como os de pior disponibilidade da máquina e três como os de melhor disponibilidade, todos operados pelo mesmo colaborador. Para uma análise aprofundada, foi incorporada à carta de controle a bateria dos Testes de Nelson, que avaliam a presença de padrões estatísticos não aleatórios mesmo quando os pontos se mantêm dentro dos limites de controle.

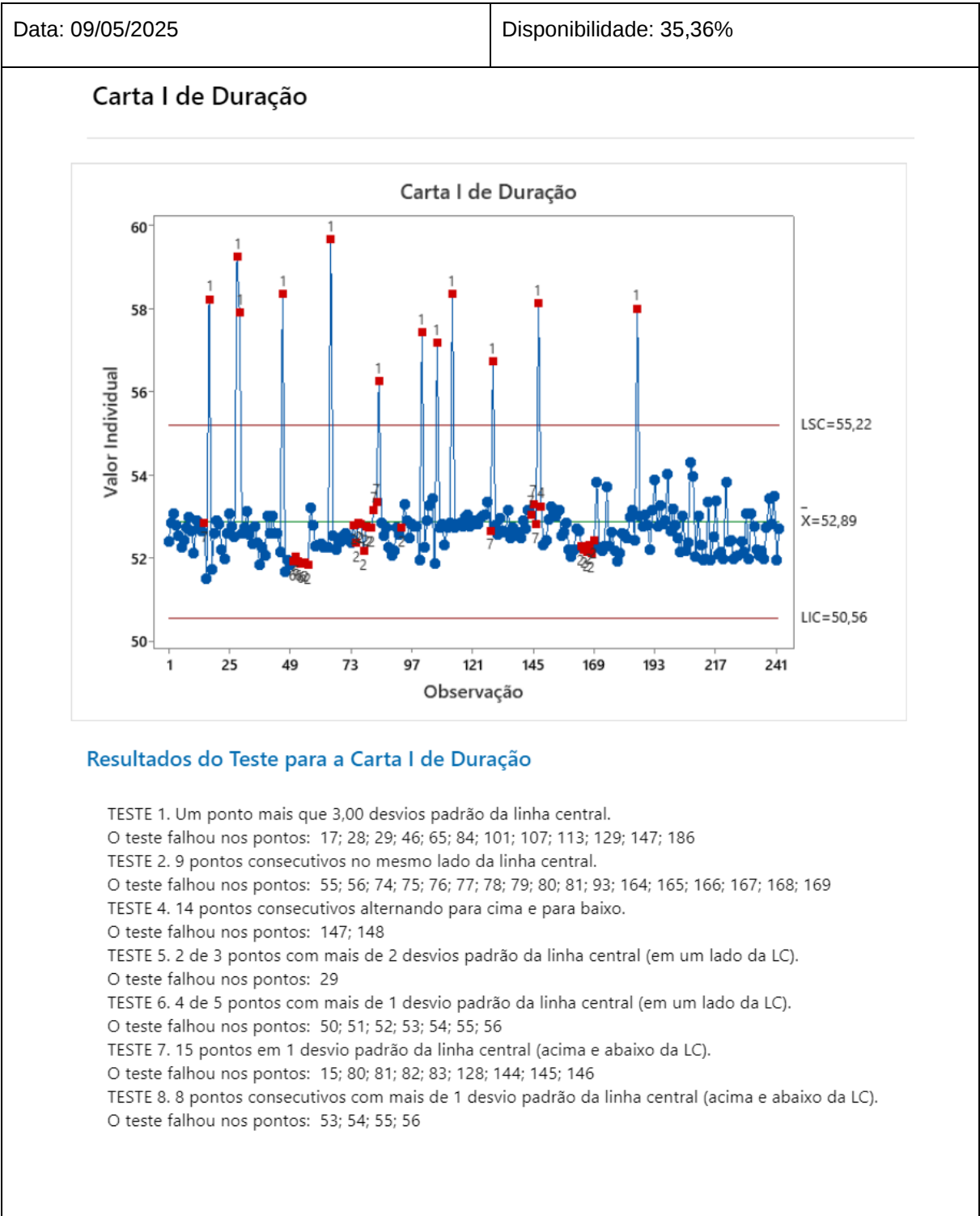
Os dados considerados, apresentados na Tabela 4, foram apenas os tempos de ciclo produtivos, ou seja, sem considerar os tempos de parada, permitindo a análise da variação do processo durante o funcionamento normal da máquina.

Tabela 4 - Dados analisados por CEP.

Período	Disponibilidade [%]	Qtd de Ciclos [un]
09/05/2025	35,36	242
14/05/2025	40,75	278
03/04/2025	43,38	300
02/05/2025	70,68	504
08/04/2025	72,05	498
20/05/2025	73,54	492

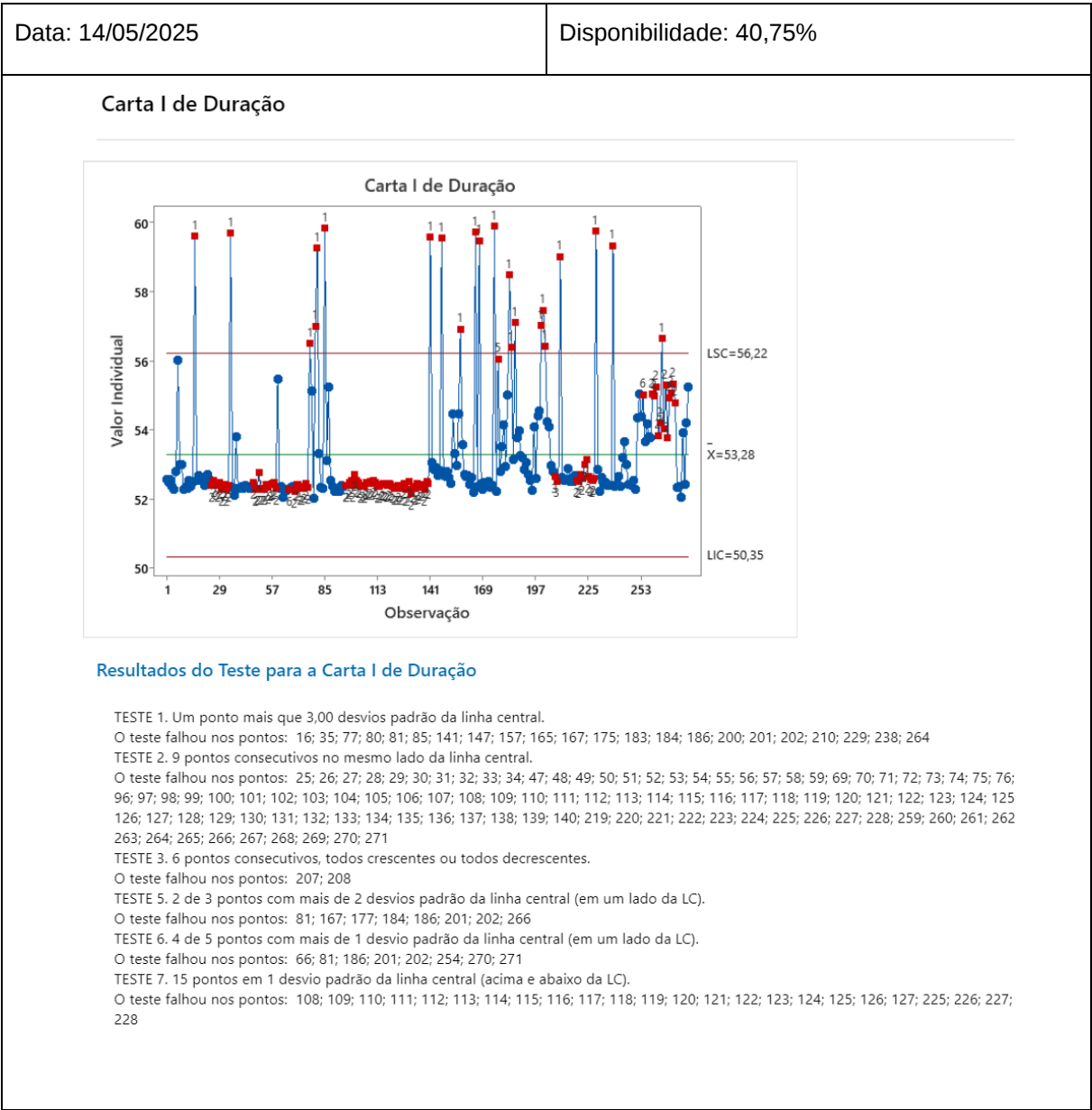
Fonte: Dados do autor (2025).

Tabela 5 – Controle Estatístico de Processo – 09/05/2025



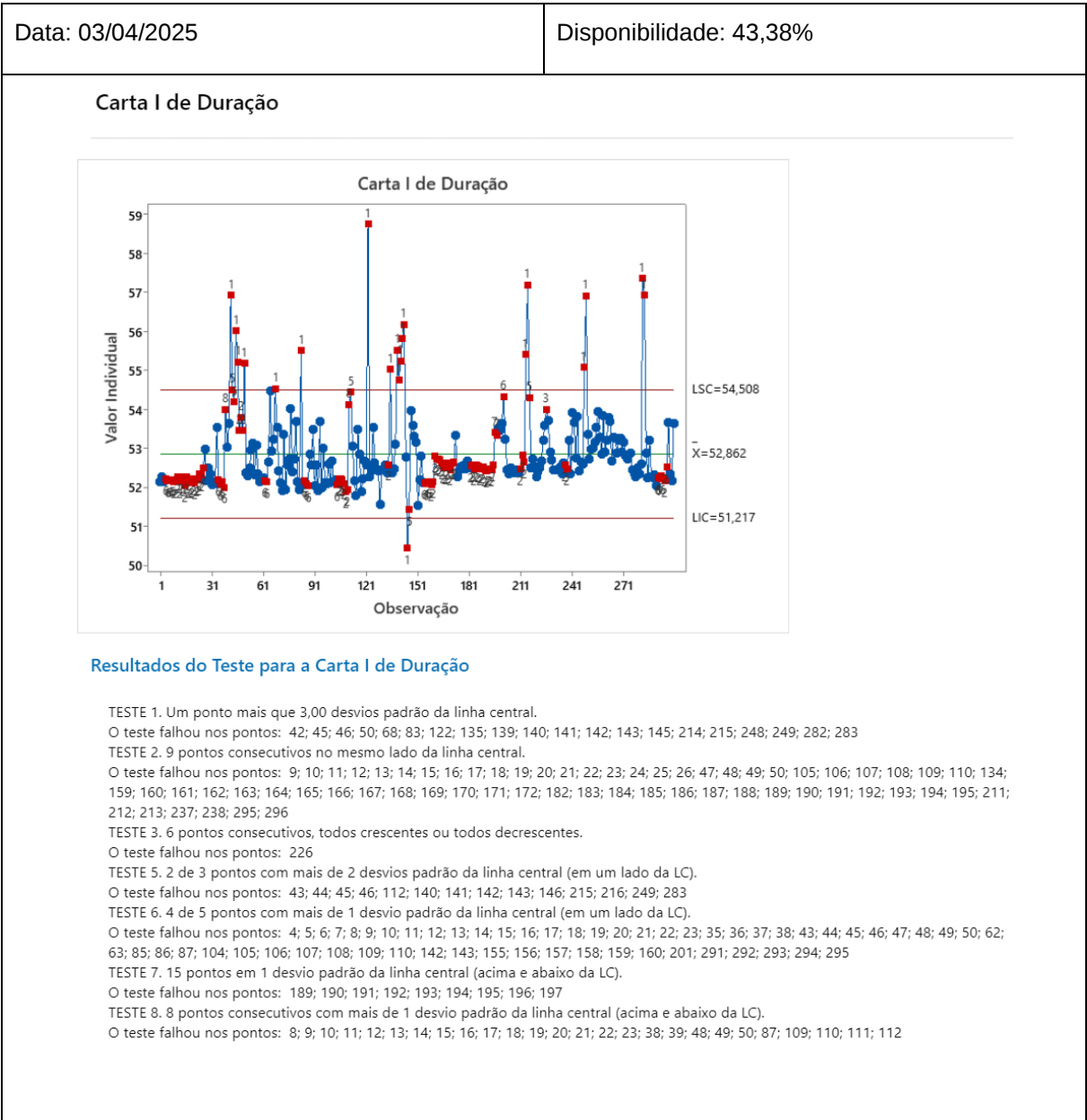
Fonte: Dados do autor (2025), análise realizada no Minitab.

Tabela 6 – Controle Estatístico de Processo – 14/05/2025.



Fonte: Dados do autor (2025), análise realizada no Minitab.

Tabela 7 – Controle Estatístico de Processo – 03/04/2025.



Fonte: Dados do autor (2025), análise realizada no Minitab.

Tabela 8 – Controle Estatístico de Processo – 02/05/2025.

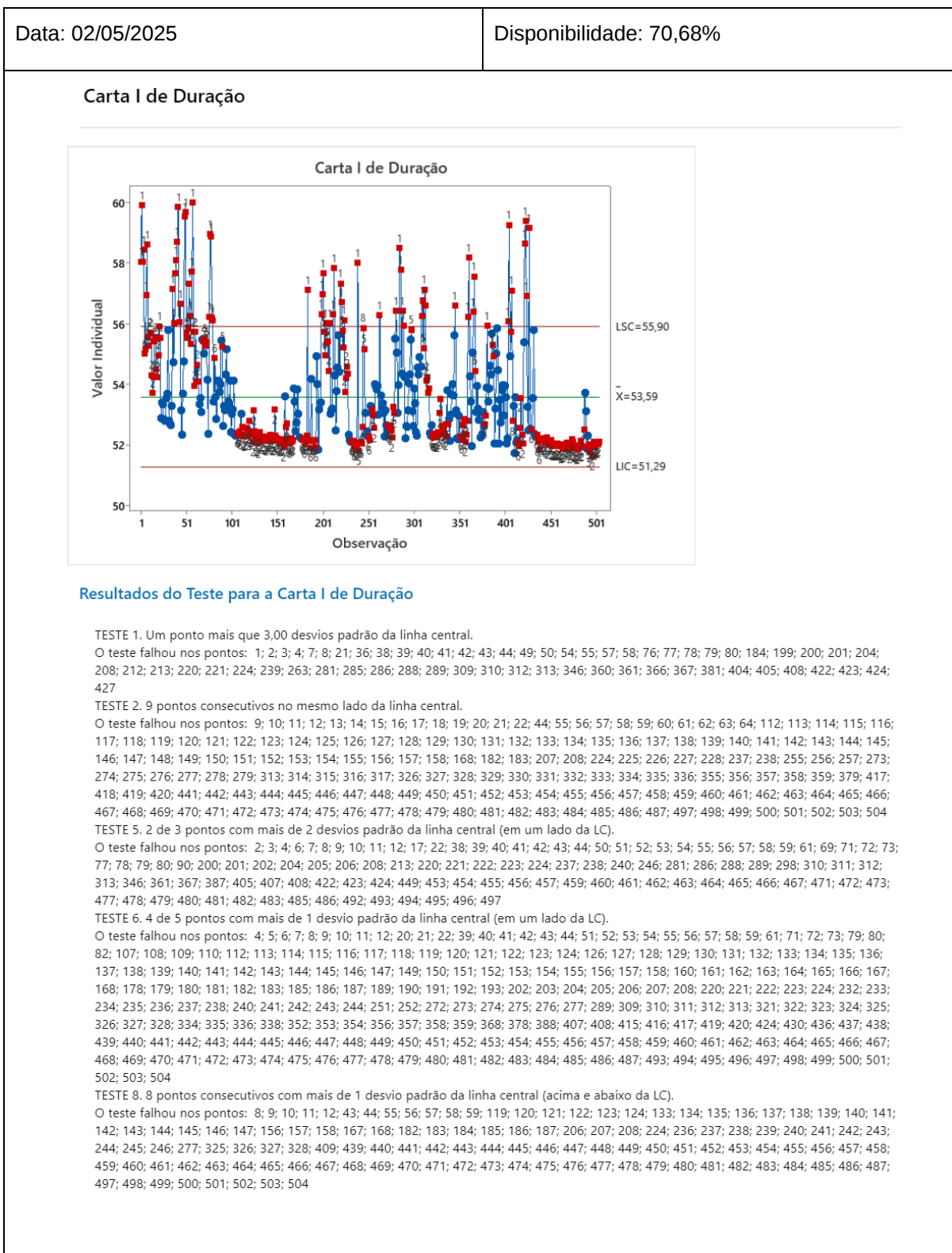
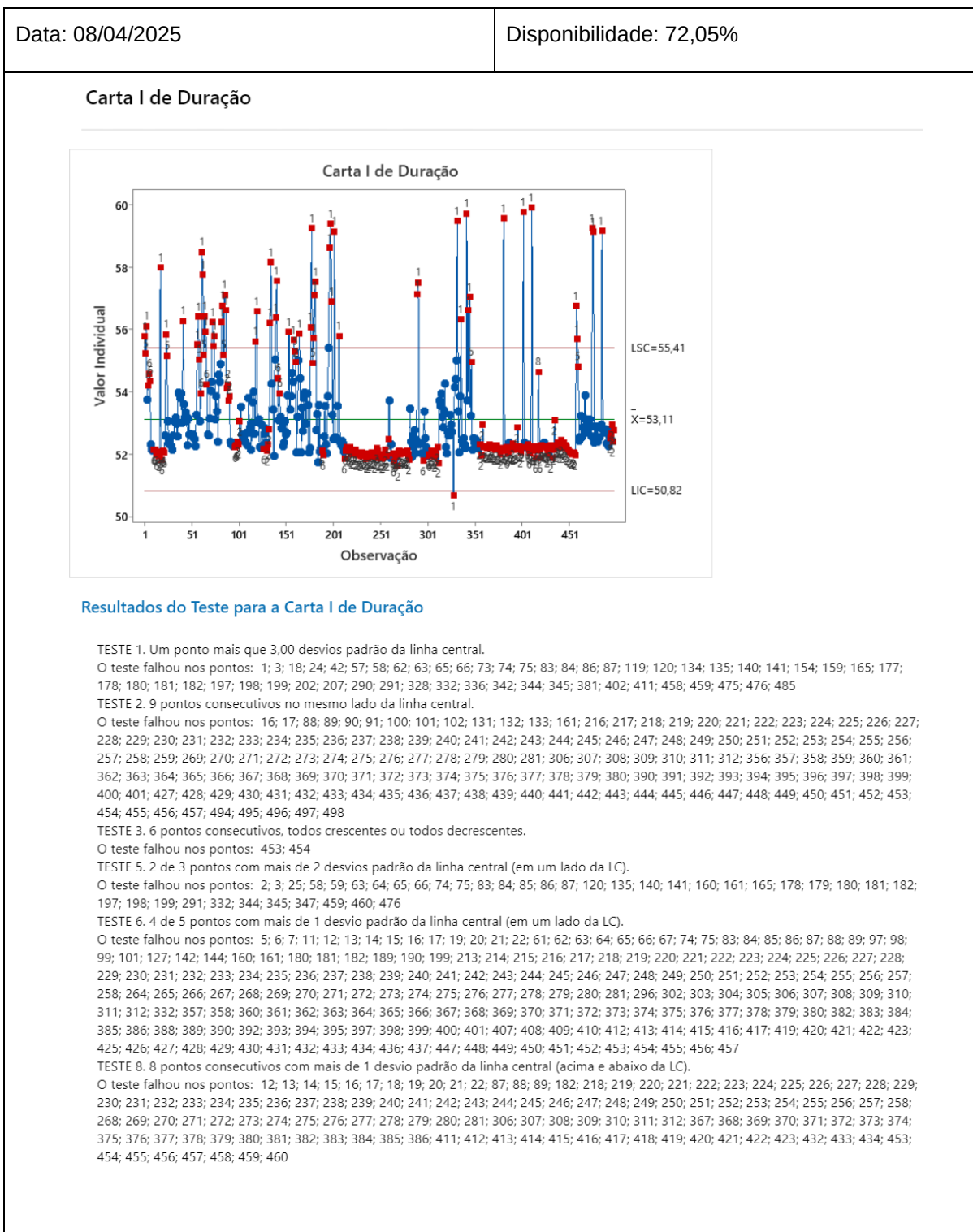
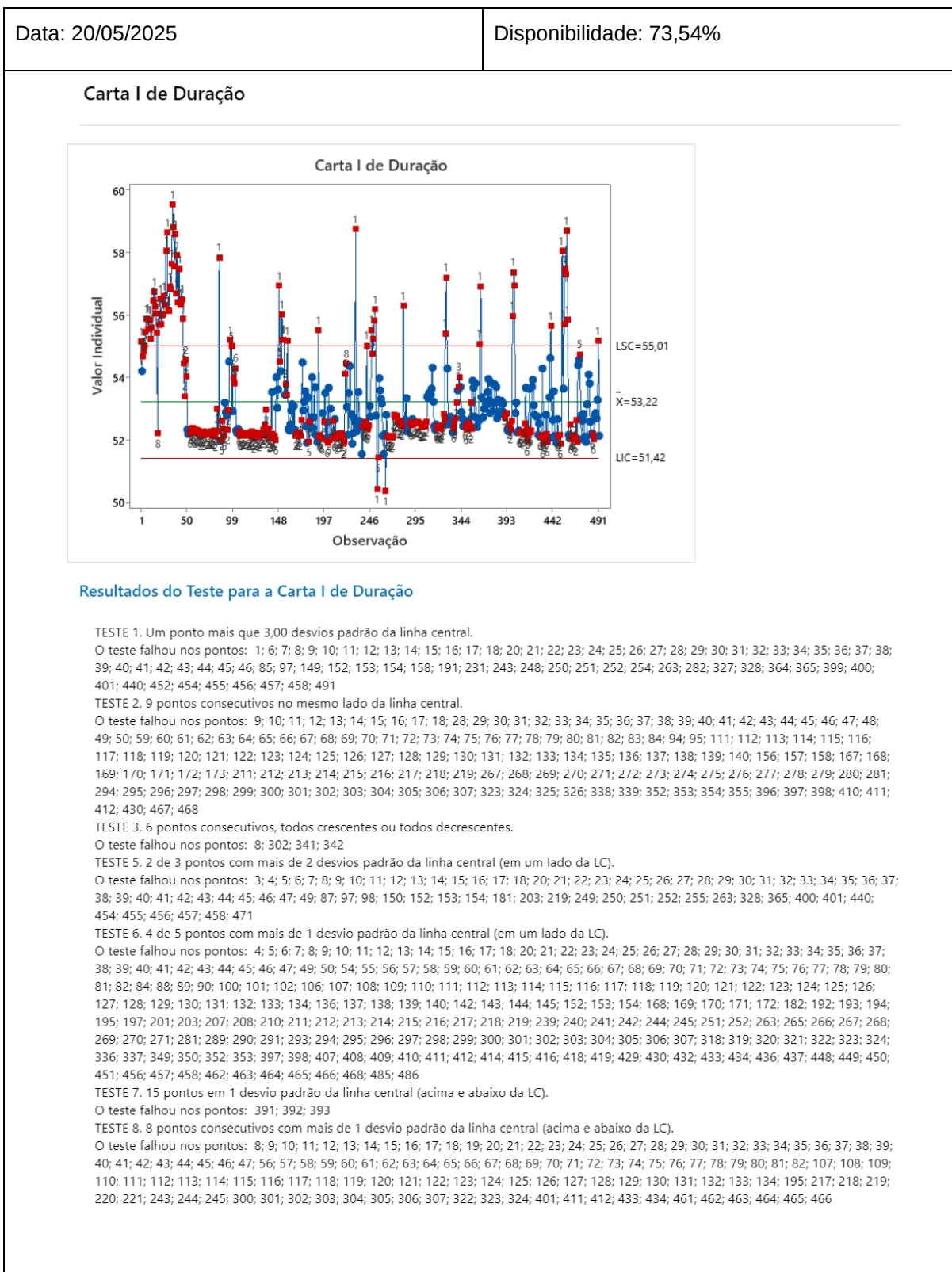


Tabela 9 – Controle Estatístico de Processo – 08/04/2025.



Fonte: Dados do autor (2025), análise realizada no Minitab.

Tabela 10 – Controle Estatístico de Processo – 20/05/2025.



Fonte: Dados do autor (2025), análise realizada no Minitab.

Avaliando os resultados apresentados nos estudos acima podemos observar alguns fenômenos:

- Nos dias de pior disponibilidade, os gráficos apresentaram menos falhas nos Testes de Nelson;
- Nos dias de melhor disponibilidade, foram observadas mais falhas nos Testes de Nelson, com presença significativa de padrões como:
 - Sequências consecutivas acima ou abaixo da linha central (regra 2);
 - Pontos agrupados próximos aos limites de 1 e 2 desvios padrão (regras 5 e 6);
 - Alternâncias regulares ou tendências visíveis (regras 4 e 7).

Esse comportamento, embora à primeira vista possa parecer contraditório, possui explicação técnica coerente e é compatível com a estatística aplicada ao controle de processos.

Nos dias de maior disponibilidade, a máquina permaneceu em produção por longos períodos ininterruptos, gerando grandes sequências de ciclos estáveis. Essa estabilidade operacional, embora desejável, acaba favorecendo a formação de padrões regulares nos dados, como:

- Longas sequências acima ou abaixo da média;
- Alternância rítmica entre dois valores;
- Agrupamentos próximos aos limites internos de controle.

Esses padrões, mesmo sendo normais do ponto de vista da operação, violam regras estatísticas de aleatoriedade estabelecidas nos Testes de Nelson, resultando em maior número de falhas detectadas no CEP.

Já nos dias de baixa disponibilidade, as paradas frequentes interrompem o fluxo de ciclos, tornando os dados mais espaçados, irregulares e com menor volume contínuo. Isso reduz a chance de formação de padrões estatísticos identificáveis, fazendo com que o gráfico aparente estar mais “sob controle”, mesmo com menor eficiência produtiva.

O comportamento identificado reforça a necessidade de não interpretar os testes de Nelson de forma isolada. Embora tenham apontado maior número de falhas nos dias de melhor desempenho, estas não representam instabilidade ou problemas operacionais, mas sim a formação de padrões naturais decorrentes de uma operação contínua e sem paradas.

Portanto, o uso do CEP com os testes de Nelson nesse contexto complementa a análise tradicional da disponibilidade da máquina, mostrando que:

- Mais falhas nos testes nem sempre indicam maior problema, podem ser um reflexo da própria estabilidade do processo;
- A interpretação contextual dos dados operacionais é indispensável;
- O CEP, associado a esse tipo de análise, é uma ferramenta de diagnóstico valiosa, inclusive para distinguir variações naturais de desvios reais de processo.

5.2.2 Classificação das Causas de Parada

Com base na categorização definida no capítulo anterior, as causas das paradas foram organizadas conforme as anotações de campo e entrevistas com operadores e supervisores. A Tabela 11 resume as causas mais frequentes, juntamente com seus impactos em termos de frequência e tempo perdido.

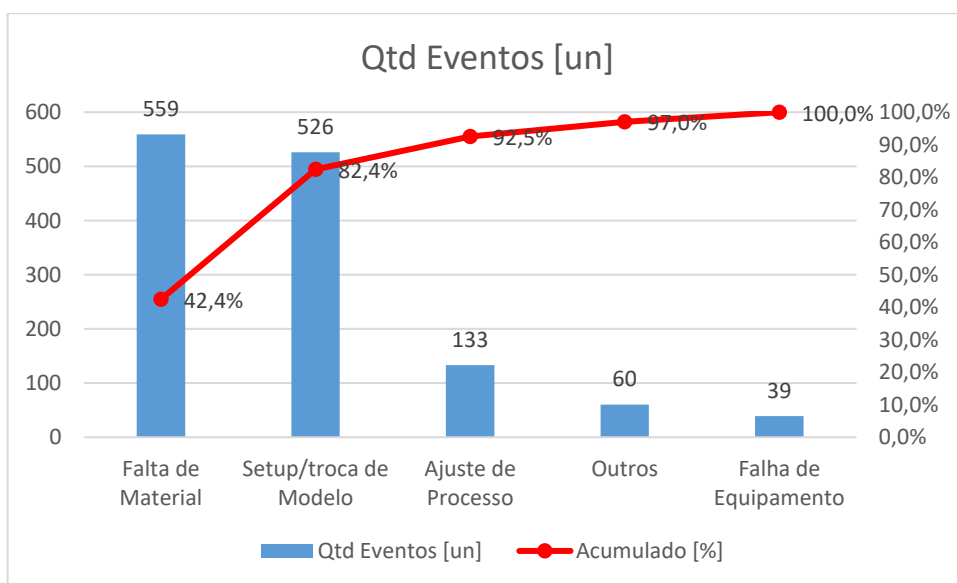
Tabela 11 – Classificação das causas de parada de produção.

	Qtd Eventos [un]	Tempo Total [h]	Tempo Médio [min]
Ajuste de Processo	133	19,80	8,93
Falha de Equipamento	39	16,21	24,95
Falta de Material	559	133,10	14,29
Setup/troca de Modelo	526	22,47	2,56
Outros	60	58,58	58,58

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

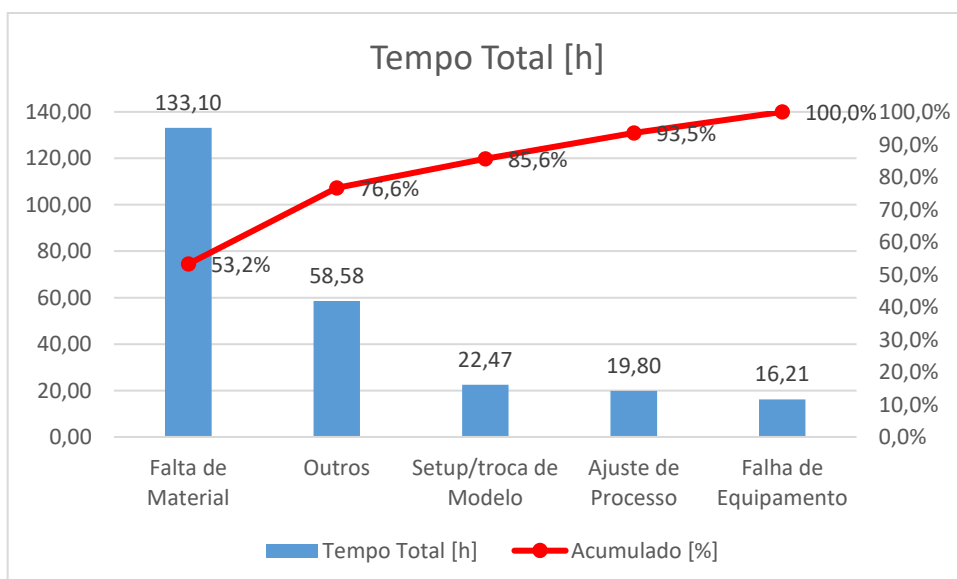
As Figuras 8 e 9 apresentam a distribuição das causas de parada por quantidade de ocorrências e por tempo total de parada respectivamente. A análise dos dados evidencia que as causas mais recorrentes e impactantes são operacionais e de suprimentos, destacando-se as faltas de molde e de metal e a alta frequência de troca de modelo como os principais limitadores de disponibilidade.

Figura 8 – Distribuição das causas de parada por quantidade de ocorrência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 9 – Distribuição das causas de parada por tempo total de parada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

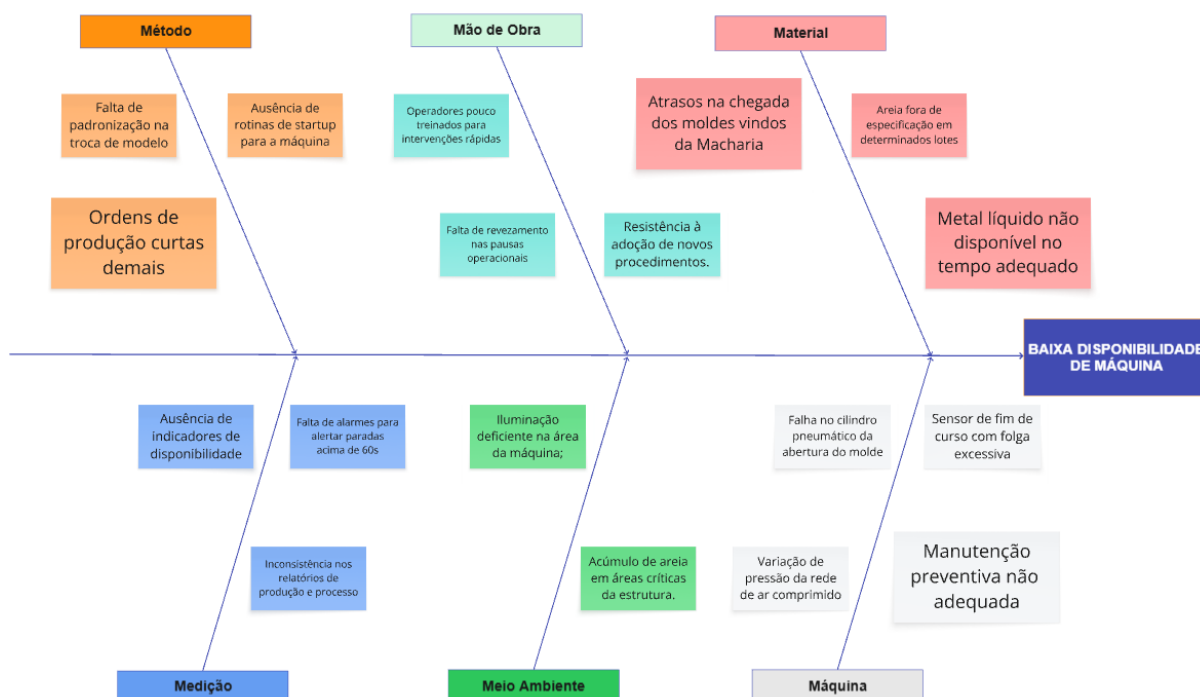
Esses resultados embasaram a construção do Diagrama de Ishikawa e a priorização das ações corretivas, que serão detalhadas nos itens seguintes.

5.2.3 Estudo com Diagrama de Ishikawa

A análise das causas das paradas de máquina foi aprofundada por meio da ferramenta de qualidade conhecida como Diagrama de Causa e Efeito, ou Diagrama de Ishikawa, que permite estruturar visualmente os possíveis fatores que contribuem para um problema identificado — neste caso, a baixa disponibilidade da máquina de moldagem da Linha A.

Para garantir a validade da análise, foi realizada uma sessão de brainstorming com uma equipe multidisciplinar, composta por operadores de máquina, supervisores de produção, técnicos de manutenção e representantes da engenharia de processos. Essa abordagem colaborativa teve o objetivo de reunir tanto o conhecimento tácito quanto as evidências levantadas durante o monitoramento da linha. As causas foram organizadas com base na estrutura clássica dos 6Ms, apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de Ishikawa com as principais causas de parada de produção.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa estruturação permitiu visualizar de forma clara as raízes dos principais eventos de indisponibilidade, sendo crucial para priorizar ações que gerem impacto direto no aumento da disponibilidade. O Ishikawa também funcionou como ferramenta integradora, valorizando a participação da equipe e promovendo o engajamento com a solução dos problemas. A análise evidenciou que os fatores mais críticos estão relacionados a:

- Interrupções por falta de metal para vazamento (Material);
- Ordens de produção com baixa quantidade de moldes (Método);
- Interrupções por ausência de moldes (Material);
- Falhas mecânicas não tratadas preventivamente (Máquina).

5.2.4 Propostas de Melhorias e Estimativa de Resultados

Com base nas causas identificadas no Diagrama de Ishikawa, foram selecionadas as ações de maior potencial de impacto, priorizando aquelas de rápida

implementação, baixo custo e viabilidade técnica. As ações foram organizadas por tema, detalhando seu objetivo e o impacto esperado na disponibilidade da máquina.

A partir das causas identificadas, foram elaboradas ações corretivas estruturadas para cada grupo de problema, as quais são apresentadas na Tabela 12. As principais propostas são:

Tabela 12 – Ações propostas para aumento da disponibilidade da máquina.

CAUSA IDENTIFICADA	AÇÃO PROPOSTA	OTIMIZAÇÃO
Falta de metal para vazamento (<i>material</i>)	Implementar comunicação visual entre setor de fusão e moldagem; criação de rotina de previsão de demanda de metal com base na programação de moldes.	Redução de 25% nas paradas por falta de metal
Ordens de produção com baixa quantidade de moldes (<i>método</i>)	Expandir o <i>forecast</i> de produção para 30 dias; limitar ordens mínimas a 30 moldes.	Redução de 15% nos setups
Falta de moldes prontos (<i>material</i>)	Adotar sistema de sinalização antecipada entre setores (kanban visual); integração do almoxarifado com o setor de preparação de moldes.	Redução de 30% nas paradas por falta de molde
Falhas mecânicas não tratadas preventivamente (<i>máquina</i>)	Inserção formal da máquina no plano de manutenção preventiva, com inspeção semanal em sensores, cilindros e conectores.	Redução de 40% nas falhas técnicas

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com a aplicação dessas quatro ações, estima-se um aumento na disponibilidade média da máquina de aproximadamente 12 a 15 pontos percentuais, elevando o indicador de 54,9% para valores entre 67% e 70%, o que representa um ganho significativo em termos de volume de produção e previsibilidade operacional. Além da melhoria direta no indicador, espera-se também ganhos indiretos, como:

- Redução da sobrecarga em outros setores devido a reprogramações de última hora;
- Maior estabilidade operacional;
- Aumento da confiança dos operadores e supervisores na confiabilidade da máquina;
- Criação de base para futuras automações e indicadores em tempo real.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal a análise da disponibilidade da máquina de moldagem da Linha A de uma empresa de fundição, por meio da aplicação estruturada de ferramentas da qualidade, tecnologia embarcada de monitoramento e metodologia PDCA.

A instalação de um dispositivo IoT permitiu realizar a coleta contínua e precisa dos tempos de ciclo da máquina, viabilizando a identificação automática das paradas de produção. A partir desses dados, foi possível realizar análises quantitativas e qualitativas, incluindo:

- Cálculo da disponibilidade real da máquina ao longo de 55 dias;
- Classificação detalhada das causas de parada;
- Aplicação de ferramentas da qualidade.
- Proposição de ações corretivas com estimativas de impacto operacional.

Os resultados evidenciaram que a disponibilidade média da máquina estava em 54,9%, abaixo dos valores considerados adequados para fundições. As principais causas foram relacionadas à logística interna, como a falta de metal e de moldes, ao sequenciamento de ordens curtas e à ausência de manutenção preventiva formalizada.

A partir das ações propostas, estima-se que a disponibilidade pode alcançar valores entre 67,0% e 70,0%, promovendo ganhos concretos em produtividade, estabilidade e eficiência operacional.

Além do aumento nos indicadores de desempenho, o projeto demonstrou que soluções de baixo custo e alta aplicabilidade, como o uso de microcontroladores com conectividade Wi-Fi e plataformas abertas de visualização, são capazes de transformar a forma como as empresas monitoram e analisam seus processos.

Este estudo também reforça a importância do engajamento da equipe de produção nas etapas de diagnóstico e construção de soluções, promovendo uma cultura de melhoria contínua com base em dados reais.

Com a aplicação do ciclo PDCA, o trabalho conseguiu alcançar os objetivos de identificação do problema, diagnóstico da causa e formulação de soluções viáveis. As

ações agora podem ser validadas em campo pela empresa, completando o ciclo com base nos dados levantados.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na experiência adquirida durante o desenvolvimento deste trabalho, são sugeridas as seguintes possibilidades de estudos complementares e aprofundamentos futuros:

- Implementação de manutenção preditiva: integrar sensores de vibração, temperatura ou corrente elétrica para prever falhas antes que ocorram, aumentando ainda mais a disponibilidade da máquina.
- Expansão do sistema de monitoramento para outras máquinas críticas da fundição, com o objetivo de obter uma visão sistêmica da operação.
- Desenvolvimento de dashboards integrados com indicadores de disponibilidade, OEE e causas de parada, com visualização em tempo real.
- Estudo de impacto financeiro das paradas de máquina, relacionando disponibilidade com custo por peça, retrabalho e desperdício de materiais, possibilitando priorização de investimentos.

Essas possibilidades podem contribuir para a consolidação de uma cultura orientada a dados e para o avanço da transformação digital em empresas do setor de fundição e manufatura em geral.

REFERÊNCIAS

- ABIFA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO.** Indicadores de desempenho da indústria de fundição. São Paulo: ABIFA, 2023. Disponível em: <https://www.abifa.org.br>. Acesso em: 15 maio 2025.
- ALMEIDA, F. J. et al.** Aplicações de dispositivos embarcados para controle de produção. *Revista Brasileira de Automação*, v. 24, n. 2, p. 39–47, 2022.
- CAMPOS, V. F.** *Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia*. 9. ed. Belo Horizonte: INDG, 2004.
- COSTA NETO, P. L. O.** *Controle estatístico da qualidade: uma abordagem prática*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- GIL, A. C. et al.** Fundamentos da manufatura digital e o papel da conectividade. *Revista Gestão Industrial*, v. 38, n. 1, p. 19–27, 2022.
- ISHIKAWA, K.** *Controle de qualidade total: à maneira japonesa*. 1. ed. São Paulo: IMAM, 1986.
- KAGERMANN, H. et al.** *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt: ACATECH, 2013.
- MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P.** *Administração da produção*. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.
- McKINSEY & COMPANY.** *The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity*. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com>. Acesso em: 15 maio 2025.
- MIGUEL, P. A. C.** *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- MONTGOMERY, D. C.** *Introduction to Statistical Quality Control*. 6. ed. New York: Wiley, 2009.
- NAKAJIMA, S.** *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge: Productivity Press, 1988.
- PALADINI, E. P.** *Gestão da qualidade: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

PINTO, J. C. et al. Melhoria da produtividade na fundição por meio do controle de paradas. *Revista Inovação Industrial*, v. 11, n. 1, p. 55–62, 2020.

SLACK, N. et al. *Administração da produção*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

STURGES, H. A. The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, v. 21, n. 153, p. 65–66, 1926.

WFO – WORLD FOUNDRY ORGANIZATION. Global Foundry Report. 2022. Disponível em: <https://www.thewfo.com>. Acesso em: 20 maio 2025.