

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JONATHAN RODRIGO MOREIRA FONSECA

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE USINAGEM CNC PARA
AUMENTAR A EFICIÊNCIA PRODUTIVA NA INDÚSTRIA**

**Betim
2026**

JONATHAN RODRIGO MOREIRA FONSECA

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE USINAGEM CNC PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA PRODUTIVA NA INDÚSTRIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora do
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais *Campus*
Betim, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof Dr. André Fonseca Félix
Coorientador: Prof. Me. João Paulo
Moreira Santos Barbosa

**Betim
2026**

FICHA CATALOGRÁFICA

F676o Fonseca, Jonathan Rodrigo Moreira

Otimização de processos de usinagem CNC para aumentar a eficiência produtiva na indústria / Jonathan Rodrigo Moreira Fonseca. – 2026.

71 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientador: Prof. Dr. André Fonseca Félix

Coorientador: Prof. Me. João Paulo Moreira Santos Barbosa

1. Usinagem CNC. 2. Indústria 4.0. 3. Eficiência produtiva. 4. Monitoramento em tempo real. 5. Engenharia Mecânica. I. Fonseca, Jonathan Rodrigo Moreira. II. Título.

CDU: 621.7

JONATHAN RODRIGO MOREIRA FONSECA

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE USINAGEM CNC PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA PRODUTIVA NA INDÚSTRIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora do
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais Campus
Betim, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 06/02/2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE FONSECA FELIX**
Data: 20/03/2026 21:51:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Fonseca Félix – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **JOAO PAULO MOREIRA SANTOS BARBOSA**
Data: 20/03/2026 11:44:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. João Paulo Moreira Santos Barbosa – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO**
Data: 19/03/2026 16:23:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **VIRGIL DEL DUCA ALMEIDA**
Data: 20/03/2026 09:31:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Virgil Del Duca – IFMG Campus Betim

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, a meus familiares, ao meu orientador e a todos que contribuíram para que pudesse concluí-lo com excelência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado sabedoria em lidar com as múltiplas obrigações diárias, pela saúde e por iluminar o meu caminho até este momento.

À todas as pessoas que me incentivaram, em especial, meu pai Luiz e minha mãe Maria.

Ao meu orientador professor André Félix pelo entusiasmo e contribuição ímpar durante os desenvolvimentos.

Ao meu coorientador professor João Paulo, que, com sua experiência na indústria, contribuiu significativamente para o direcionamento técnico e para a finalização deste trabalho, enriquecendo sua qualidade com orientações valiosas.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais pela oportunidade de formação acadêmica gratuita e de excelente qualidade, juntamente com todos os professores e colaboradores.

Ao SENAI, que além de meu empregador e parceiro na validação das teorias deste trabalho, é o local onde coloco em prática tudo que sei e que aprendo dia a dia desde os meus 16 anos.

*“Aqueles que não
fazem nada estão sempre
dispostos a criticar os que
fazem algo.”*

Oscar Wilde

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo aplicado de otimização de processos de usinagem CNC com foco na adoção de tecnologias da Indústria 4.0. A pesquisa foi realizada em uma empresa do setor automotivo, onde foram implantados sistemas de monitoramento digital em tempo real, utilizando dispositivos IoT para coleta de dados operacionais. As estratégias envolveram a análise de gargalos produtivos, reprogramação CNC, avaliação de ferramentas de corte e aplicação de metodologias como OEE e manutenção autônoma, alinhadas aos princípios da manufatura enxuta. A abordagem combinou técnicas qualitativas e quantitativas, permitindo a identificação de falhas, implementação de contramedidas e acompanhamento dos resultados. Como principais ganhos, destacam-se o aumento de 11,87% na produtividade, melhoria de 4,68% no OEE e redução significativa nas paradas não planejadas. Os resultados demonstram que a integração entre sistemas físicos e digitais contribui diretamente para a eficiência produtiva, confiabilidade e sustentabilidade dos processos industriais.

Palavras-chave: Usinagem CNC, Indústria 4.0, Eficiência Produtiva, Monitoramento em Tempo Real, Internet das Coisas (IoT), OEE (Overall Equipment Effectiveness), Manufatura Enxuta.

ABSTRACT

This paper presents an applied study of CNC machining process optimization, focusing on the adoption of Industry 4.0 technologies. The research was conducted at an automotive company, where real-time digital monitoring systems were implemented, using IoT devices to collect operational data. The strategies involved analyzing production bottlenecks, CNC reprogramming, evaluating cutting tools, and applying methodologies such as OEE and autonomous maintenance, aligned with lean manufacturing principles. The approach combined qualitative and quantitative techniques, enabling the identification of failures, implementation of countermeasures, and monitoring of results. The main benefits include an 11.87% increase in productivity, a 4.68% improvement in OEE, and a significant reduction in unplanned downtime. The results demonstrate that the integration of physical and digital systems directly contributes to the production efficiency, reliability, and sustainability of industrial processes.

Keywords: CNC Machining, Industry 4.0, Production Efficiency, Real-Time Monitoring, Internet of Things (IoT), OEE (Overall Equipment Effectiveness), Lean Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do Tempo: Usinagem CNC	18
Figura 2 - Interface de um editor de programas	22
Figura 3 - Área gráfica do ambiente CAD Siemens NX	23
Figura 4 - Área gráfica do ambiente CAM Siemens NX	23
Figura 5 - Torno CNC com ferramenta acionada ROMI GL250M	24
Figura 6 - Centro de Usinagem ROMI D800	24
Figura 7 - Centro de Usinagem 5 eixos GROB G150	24
Figura 8 - Inserto de Metal Duro Mitsubishi modelo VCGT	26
Figura 9 - Simulação de usinagem de fresamento de turbina no NX CAM	28
Figura 10 - Refrigeração líquida direcionada	29
Figura 11 - Etapas que marcaram as revoluções industriais	30
Figura 12 - Os nove pilares da Indústria 4.0	31
Figura 13 - Integração entre a máquina CNC, o gateway IoT e a plataforma em nuvem para geração de dashboards operacionais em tempo real.....	33
Figura 14 - Exemplo de módulo M2M	33
Figura 15 - Representação esquemática do papel do Gateway no sistema.....	34
Figura 16 - Exemplo de interface gráfica criada com Node-RED.....	34
Figura 17 - Apalpador RENISHAW OMP60 em um Centro de Usinagem	37
Figura 18 - Área de produção da empresa A_XXXXX	40
Figura 19 - WISE-4050	44
Figura 20 - Tela de interface do MInA.....	45
Figura 21 - Instalação do WISE-4050 na máquina de usinagem HELLER.....	49
Figura 22 - Paradas registradas em segundos no processo Montante 598	51
Figura 23 - Pares de peças por hora	52
Figura 24 - Tempo de ciclo médio por par de peças	52
Figura 25 - MTBF nos meses de análise	53
Figura 26 - Diagrama de Ishikawa empresa A_XXXXX	53
Figura 27 - Metodologia dos 5 Porquês empresa A_XXXXX.....	54
Figura 28 - Método 5W2H para gestão da resolução dos problemas identificados na Empresa A_XXXXX.....	54
Figura 29 - Recorte 1 do 5W2H.....	55
Figura 30 - Recorte 2 do 5W2H.....	55

Figura 31 - Acompanhamentos das contramedidas apresentadas na empresa A_XXXXX.....	56
Figura 32 - Pares de peças por hora após contramedidas.....	57
Figura 33 - Tempo de ciclo médio por par de peças após contramedidas	57
Figura 34 - MTBF nos meses de análise após contramedidas.....	57
Figura 35 - Método A3	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medições iniciais da empresa A_XXXXX	50
Tabela 2 - Medições finais da empresa A_XXXXX.....	59
Tabela 3 - Resultados comparativos entre medições inicial e final da empresa A_XXXXX.....	59
Tabela 4 - Comparação dos indicadores de desempenho antes e depois da consultoria	62

ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANDON	Sistema de sinalização visual para controle de produção
API	Interface de Programação de Aplicações – <i>Application Programming Interface</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador – <i>Computer Aided Design</i>
CAM	Manufatura Assistida por Computador - <i>Computer Aided Manufacturing</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	Instituto Alemão de Normas - <i>Deutsches Institut für Normung</i>
DNC	Controle Numérico Direto - <i>Direct Numeric Control</i>
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto – Hypertext Transfer Protocol
IoT	Internet das Coisas - <i>Internet of Things</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização - <i>International Organization for Standardization</i>
JSON	Notação de Objetos JavaScript – JavaScript Object Notation
MD	Metal Duro
MES	Sistema de Execução da Manufatura - <i>Manufacturing Execution Systems</i>
MQTT	Protocolo de Telemetria de Fila de Mensagens – <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante – <i>Minimum Quantity Lubrication</i>
MTBF	Tempo Médio Entre Falhas – <i>Mean Time Between Failures</i>
OEE	Eficiência Global do Equipamento - <i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OPC-UA	Arquitetura Unificada de Controle de Processo – Open Platform Communications Unified Architecture
RTU	Unidade Terminal Remota – Remote Terminal Unit
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SMED	Troca Rápida de Ferramenta - <i>Single Minute Exchange of Dies</i>

TCP	Protocolo de Controle de Transmissão – Transmission Control Protocol
TI	Tecnologia da Informação
TPM	Manutenção Produtiva Total - <i>Total Productive Maintenance</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

kW	quilowatt
m	metro
min	minuto
mm	milímetro
Nm	Newton metro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos.....	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Estratégias Tradicionais de Otimização.....	25
2.2	Modelagens Avançadas e Simulações	29
2.3	Indústria 4.0 e Otimização em Tempo Real.....	30
2.3.1	Dispositivos IoT para Coleta de Dados em Máquinas CNC	32
2.4	Desafios e Considerações Futuras na Otimização de Processos CNC	35
2.4.1	Máquinas CNC versus Indústria 4.0	36
2.5	Ferramentas da Qualidade	37
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	Caracterização da Pesquisa e Contexto do Estudo de Caso	40
3.2	Classificação da pesquisa e etapas do desenvolvimento.....	42
3.3	Recursos	43
3.4	Limitações da Pesquisa.....	46
3.5	Cálculo dos Indicadores de Desempenho	46
4	RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1	Análise Quantitativa Indicadores de Desempenho da empresa A_XXXXX: ..	49
4.1.1	Medições iniciais	49
4.1.1.1	Contextualização do Processo e Gargalos Produtivos	51
4.1.1.2	Condições atuais	51
4.1.1.3	Metas e objetivos.....	53
4.1.1.4	Análise.....	53
4.1.1.5	Contramedidas	54
4.1.1.6	Verificações	56
4.1.1.7	Acompanhamentos.....	56
4.1.2	Medições finais.....	59
4.1.3	Resultados da comparação entre a medição inicial e final	59
4.1.3.1	Análise do Índice de Produtividade	60
4.1.3.2	Análise do Índice de OEE.....	60

4.1.3.3	Análise do Índice de Disponibilidade	60
4.1.3.4	Análise do Índice de Performance	61
4.1.3.5	Análise do Índice de Qualidade	61
4.1.3.6	Análise do Índice do Retorno do Programa	61
4.2	Análise Qualitativa e Técnica	63
4.3	Análise Comparativa e Discussão	63
4.4	Recomendações.....	64
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A indústria moderna enfrenta o desafio constante de aumentar sua eficiência produtiva para se manter competitiva em um cenário global em rápida transformação. Nesse contexto, a usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) destaca-se como um dos processos mais relevantes, sendo amplamente utilizada na fabricação de peças com alta precisão dimensional.

A usinagem é um dos métodos mais antigos empregados na industrialização, e sua evolução acompanha diretamente os avanços tecnológicos da manufatura. As primeiras máquinas de comando numérico (CN) surgiram na década de 1940, baseadas em ferramentas convencionais adaptadas com motores controlados por sistemas de fita perfurada. Com o avanço da eletrônica, especialmente a partir da década de 1970, essas máquinas evoluíram para os sistemas CNC, incorporando microprocessadores, memórias ROM e computadores dedicados (GROOVER, 2014).

No Brasil, a tecnologia CNC foi introduzida em 1971 pela empresa ROMI, marcando o início da automação na usinagem nacional (MACHADO, 2015). Esses sistemas permitem o controle automatizado de ferramentas e peças, operando com base em programas codificados que definem parâmetros como velocidade de avanço, profundidade de corte e rotação do eixo-árvore (QUEIROZ, 2007; FITZPATRICK, 2013). A Figura 1 apresenta a linha do tempo das máquinas CNC.

Figura 1 - Linha do Tempo: Usinagem CNC



Fonte: Elaborado pelo autor com base em MACHADO et al. (2015)

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a otimização da usinagem contribui diretamente para a redução de custos, aumento da produtividade e melhoria da qualidade dos produtos. Segundo Baptista e Coppini (2005), “a otimização de processos de usinagem tem recebido diversas contribuições nos últimos anos, sempre com a aplicação de procedimentos e tecnologias que resultem na redução dos tempos e dos custos de fabricação”.

Apesar dos avanços tecnológicos, os processos de usinagem CNC ainda enfrentam gargalos produtivos que limitam a capacidade operacional e reduzem a eficiência global. Esses gargalos, relacionados a ajustes de setup, trocas de ferramentas e paradas não planejadas, impactam diretamente indicadores como tempo de ciclo e produtividade. A mitigação desses problemas é um fator estratégico para a competitividade industrial, especialmente quando associada às tecnologias da Indústria 4.0.

A Indústria 4.0 surge como uma resposta estratégica a esses desafios, oferecendo tecnologias como sensores IoT (Internet das Coisas - *Internet of Things*), monitoramento em tempo real, integração de sistemas e análise de dados operacionais. Segundo Marr (2016), “a missão da Indústria 4.0 é transformar as fábricas em ambientes inteligentes, permitindo que operem com menos interrupções e gerenciem a complexidade dos processos”.

Conforme Smith (2019), a abordagem integrada da produção — do planejamento à execução — é essencial para promover eficiência e inovação. Segundo Nascimento (2020), a aplicação de dispositivos IoT em sistemas embarcados industriais permite a geração de dados relevantes para tomada de decisão e melhoria dos processos produtivos, especialmente quando integrados a sistemas de análise e visualização em tempo real.

Neste cenário, a busca por excelência operacional tem levado as indústrias a investirem em tecnologias que promovam maior controle, previsibilidade e eficiência nos processos produtivos. Segundo Chen e Wang (2021), a manufatura inteligente, baseada em tecnologias da Indústria 4.0, permite a adaptação dinâmica dos processos produtivos por meio da coleta e análise de dados em tempo real, viabilizando decisões mais assertivas e intervenções rápidas. Além disso, Correr et al. (2018) destacam que a aplicação de metodologias estruturadas, como o SMED e o monitoramento digital, é essencial para reduzir perdas operacionais e melhorar o desempenho das máquinas CNC. A integração entre sistemas físicos e digitais, por meio de sensores IoT e plataformas de visualização, representa um avanço significativo na gestão da produção.

Neste estudo, são analisadas estratégias de otimização aplicadas a processos de usinagem CNC, com foco na adoção de tecnologias da Indústria 4.0. A abordagem considera a aplicação prática em uma empresa metalmeccânica do setor automotivo, onde foram implantados sistemas de monitoramento digital para coleta e análise de

dados produtivos. A partir dessa experiência, busca-se demonstrar como a digitalização e o controle em tempo real podem contribuir para ganhos significativos em indicadores como produtividade, disponibilidade e OEE (Eficiência Global do Equipamento - *Overall Equipment Effectiveness*).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar, desenvolver e implementar estratégias de otimização em processos de usinagem CNC, com foco na aplicação de tecnologias da Indústria 4.0, visando aumentar a eficiência produtiva por meio do monitoramento digital, da gestão de gargalos operacionais e da melhoria dos indicadores de desempenho, como produtividade, disponibilidade, qualidade e OEE.

1.1.2 Objetivos específicos

- Mapear e analisar os principais gargalos e perdas operacionais em processos de usinagem CNC, identificados a partir dos dados coletados na empresa estudada. *(diagnóstico inicial)*
- Aplicar tecnologias da Indústria 4.0, como sensores IoT e sistemas de monitoramento em tempo real, para coleta e análise de dados produtivos. *(intervenção tecnológica)*
- Avaliar e comparar os indicadores de desempenho antes e depois das intervenções, evidenciando os ganhos obtidos com a aplicação das estratégias de otimização, considerando métricas como produtividade, disponibilidade, qualidade e OEE. *(análise quantitativa e comparativa)*
- Correlacionar as ferramentas digitais utilizadas com os princípios da manufatura enxuta e práticas modernas de gestão da produção. *(análise conceitual e alinhamento teórico)*
- Propor diretrizes práticas para replicação das estratégias de otimização em outras células produtivas ou empresas metalmecânicas do setor automotivo. *(aplicabilidade e replicabilidade)*

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Atualmente, a tecnologia CNC é amplamente utilizada em diversos setores industriais, com máquinas e robôs capazes de operar em múltiplos eixos, tanto lineares quanto rotativos. Os comandos são realizados por meio de códigos de usinagem, como o código G, padronizado pela norma ISO 6983-1:1982, que são interpretados pelo sistema CNC e executados pelos elementos de movimentação (QUEIROZ, 2007; FITZPATRICK, 2013).

Entre os equipamentos mais comuns destacam-se os tornos CNC e os centros de usinagem, que contribuem significativamente para o aumento da automação nos processos industriais.

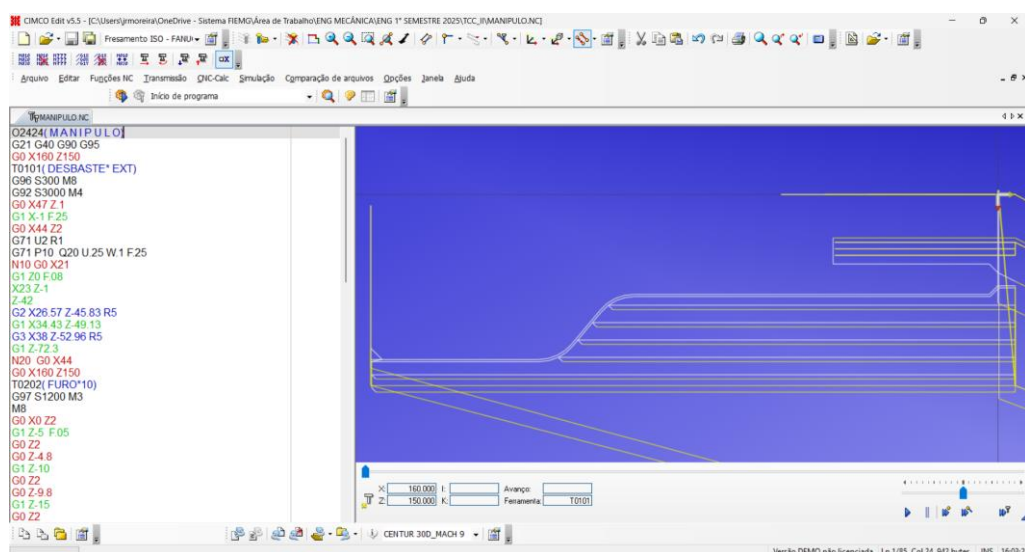
Essas máquinas operam com base em um sistema de coordenadas cartesianas, que permite o controle preciso dos movimentos dos eixos, possibilitando a fabricação de peças com geometrias complexas e alta precisão dimensional (GROOVER, 2014).

Nas usinagens complexas ou com dimensões que exigem uma tolerância na ordem de centésimos, ou quando há casos em que a produção dessas peças é em série, exigindo uma repetitividade dos processos de usinagem, o CNC executa as operações de acordo com a programação feita (CHIAVERINI, 1986).

A programação pode ocorrer de maneira manual ou automatizada, sendo categorizada especificamente como programação manual ou programação em CAD/CAM (PEREIRA, 2006).

A programação manual consiste na escrita direta dos códigos numéricos na IHM (Interface Homem-Máquina) e teclado da máquina, ou na criação de arquivos em editores de texto — com extensões como .txt, .NC ou .MPF — que são posteriormente transferidos para a memória da máquina. Essa abordagem é geralmente aplicada em operações de torneamento ou fresamento de geometrias simples, sem o uso de softwares especializados. As instruções são elaboradas manualmente, por meio de uma lista de códigos que definem as posições da ferramenta em relação à peça, além de comandos para ativar ou desativar periféricos. Nesse método, a execução do processo ocorre conforme os comandos inseridos pelo programador (PEREIRA, 2006). A Figura 2 ilustra a interface de um editor de programas com um trecho de programação desenvolvida manualmente.

Figura 2 - Interface de um editor de programas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

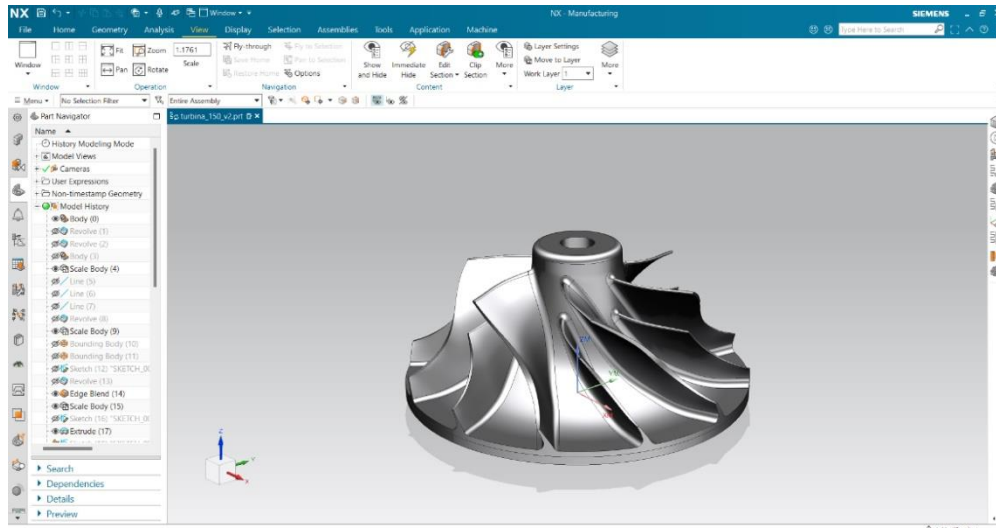
Por outro lado, a programação CAD/CAM faz uso de softwares especializados. O sistema CAD é utilizado para criar representações gráficas das peças, em 2D ou 3D, enquanto o sistema CAM interpreta esses modelos através de contornos e superfícies para converter em códigos de usinagem. Este processo de programação é mais comum em indústrias de usinagem de peças com geometrias complexas (PEREIRA, 2006).

Após a geração do programa no CAM, ocorre o pós-processamento, etapa em que o código genérico é adaptado para a linguagem específica da máquina CNC que será utilizada. O pós-processor traduz os comandos e estratégias configuradas no software em um formato compatível com o controlador da máquina, considerando parâmetros como estrutura de cabeçalho, ciclos de usinagem, sintaxe e configurações específicas de cada equipamento. Essa etapa é fundamental para garantir que o programa seja corretamente interpretado e executado pela máquina, evitando erros e otimizando o desempenho (SILVA; BEVILACQUA, 2005).

Existem softwares que integram as tecnologias CAD e CAM em uma única plataforma, como o Siemens NX. Na Figura 3, é possível visualizar um modelo tridimensional desenvolvido no ambiente CAD. Na Figura 4, observa-se esse mesmo modelo com as estratégias de usinagem definidas no módulo CAM, incluindo a etapa de pós-processamento de uma operação, que converte o programa gerado em um código específico compatível com a linguagem da máquina CNC. Esse código,

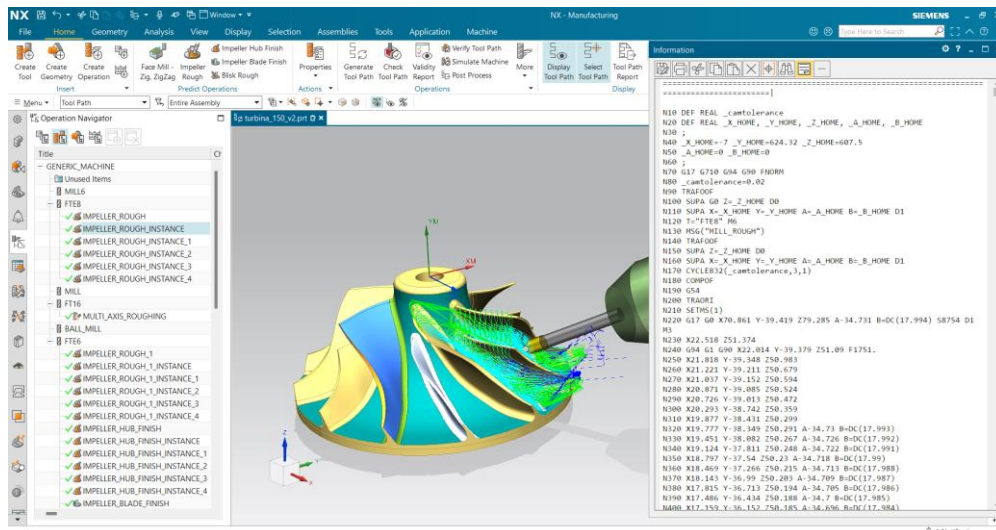
geralmente apresentado em extensões como .NC ou .MPF, é então enviado à máquina para execução precisa da operação programada.

Figura 3 - Área gráfica do ambiente CAD Siemens NX



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

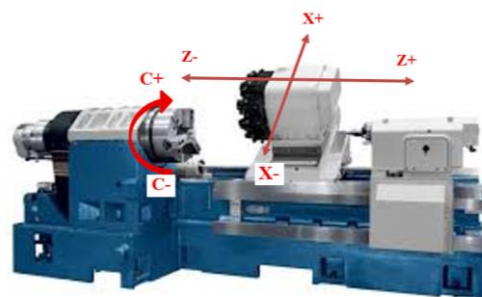
Figura 4 - Área gráfica do ambiente CAM Siemens NX



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

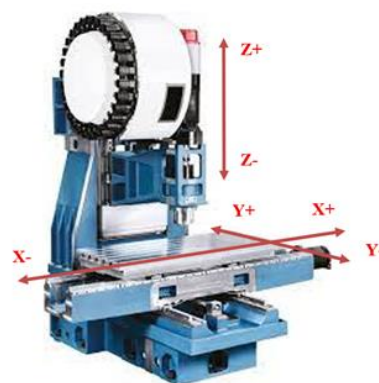
Na Figura 5 pode ser visto um exemplo de torno CNC com ferramenta acionada, na Figura 6 pode ser visto um exemplo de Centro de Usinagem 3 eixos e, na Figura 7 um exemplo de Centro de Usinagem 5 eixos, que dentro do mundo da usinagem, é o que existe de mais tecnológico no que tange à complexidade de peças que são possíveis a fabricação. Cada imagem com sua respectiva representação dos eixos controlados.

Figura 5 - Torno CNC com ferramenta acionada ROMI GL250M



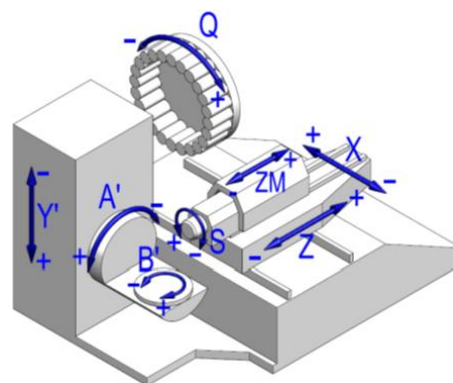
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 6 - Centro de Usinagem ROMI D800



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 7 - Centro de Usinagem 5 eixos GROB G150



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A otimização de processos de usinagem CNC tem se tornado uma preocupação central na indústria moderna, visando aprimorar a eficiência produtiva e reduzir custos operacionais. Neste contexto, diversos autores têm contribuído significativamente com informações valiosas, abordando desde estratégias específicas até a aplicação de tecnologias inovadoras para otimizar a usinagem CNC.

2.1 Estratégias Tradicionais de Otimização

A otimização de processos de usinagem CNC é uma questão central para aprimorar a eficiência produtiva na indústria moderna. Autores renomados, como Melo, A.; Caten, C. S.; Sant'Anna, A. M. O. (2015), enfatizam a importância da seleção criteriosa de parâmetros de corte. Velocidade de avanço, profundidade de corte e taxa de remoção de material são fatores cruciais que, quando ajustados de maneira adequada, não apenas otimizam a eficiência do processo, mas também minimizam o desgaste da ferramenta, maximizando sua vida útil.

Paralelamente, Pamplona, E. et al. (2014) destacam a relevância da escolha de ferramentas de corte avançadas e revestimentos especiais. A aplicação dessas inovações não apenas aumenta a resistência ao desgaste das ferramentas, mas também proporciona desempenho consistente e prolongado, resultando em melhorias significativas na eficiência global da usinagem.

Dentre as estratégias tradicionais para se obter um processo de usinagem otimizado estão:

- Programação Eficiente:

Uma programação CNC eficiente é essencial para otimizar o processo de usinagem. Isso envolve a criação de códigos de controle numérico que minimizem o tempo de ciclo e evitem movimentos desnecessários da ferramenta, contribuindo para maior produtividade e menor desgaste dos equipamentos (GROOVER, 2014).

Dependendo da geometria da peça, os ciclos automáticos de usinagem podem ser uma alternativa eficaz para reduzir o tempo de programação. Em operações de torneamento, é possível aplicar ciclos como faceamento, desbaste longitudinal, desbaste transversal e abertura de roscas. Já no fresamento, destacam-se os ciclos de fresamento de face, furação, abertura de canais e cavidades de diferentes formatos (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., 2013).

Smith (2018) complementa essa visão ao destacar que a otimização na usinagem deve considerar não apenas os parâmetros técnicos, mas também aspectos organizacionais e tecnológicos que influenciam diretamente a produtividade.

- Utilização de Ferramentas Adequadas:

A escolha correta das ferramentas de corte com base nas propriedades do material a ser usinado e nas características específicas do trabalho pode otimizar significativamente o desempenho da usinagem. “As condições de corte e a geometria

da ferramenta são fatores significativos que influenciam diretamente a potência de corte, a formação do cavaco e a eficiência do processo de usinagem” (CAMARGO et al., 2018).

É aconselhável avaliar as opções disponíveis referentes a geometrias de ferramentas de acordo com o tipo de usinagem a ser executada. Dependendo do tipo de material, método de remoção e até mesmo qualidade superficial, existirá uma ferramenta mais eficiente para atingir este objetivo. Na Figura 8 temos um exemplo de um inserto indicado à usinagem de materiais não ferrosos, mais especificamente ligas de Alumínio, que conta com a superfície superior polida para reduzir o coeficiente de atrito da remoção de cavaco.

Figura 8 - Inserto de Metal Duro Mitsubishi modelo VCGT



Fonte: MITSUBISHI MATERIALS (2024)

➤ Velocidades de Corte e Avanços Otimizados:

A seleção apropriada das velocidades de corte pode ser otimizada com base em análises econômicas e técnicas (PAMPLONA, E. et al, 2014).

Teorias de corte indicam que a seleção apropriada das velocidades de corte, dado em m/min, e avanço, dados em mm/min ou mm/rotação dependendo da máquina, pode influenciar diretamente na eficiência do processo (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., 2013). O entendimento das propriedades do material e as condições ideais de corte são fundamentais para otimizar esses parâmetros (MELO, A.; TEN CATEN, C. S.; SANT'ANNA, A. M. O, 2015).

Muitas empresas não exploram plenamente o potencial de suas máquinas e ferramentas. A compreensão das especificações técnicas dos equipamentos, bem como das características das ferramentas de corte, possibilita a configuração eficaz dos parâmetros de usinagem. Isso resulta na maximização da produtividade, evitando

tempos de processamento desnecessariamente longos e prevenindo o desgaste prematuro de elementos como os insertos, por exemplo.

➤ Monitoramento em Tempo Real:

A implementação de sistemas de monitoramento em tempo real, alinhados aos princípios da Indústria 4.0, permite a detecção precoce de falhas, a análise contínua de desempenho e a adaptação dinâmica dos parâmetros de usinagem, promovendo maior eficiência e confiabilidade no processo (CHEN; WANG, 2021).

Um dos principais indicadores utilizados para mensurar a efetividade dos equipamentos é o OEE (Overall Equipment Effectiveness). Desenvolvido por Seiichi Nakajima no contexto da Manutenção Produtiva Total (TPM), o OEE avalia a performance de um equipamento com base em três pilares: disponibilidade, performance e qualidade (NAKAJIMA, 1988).

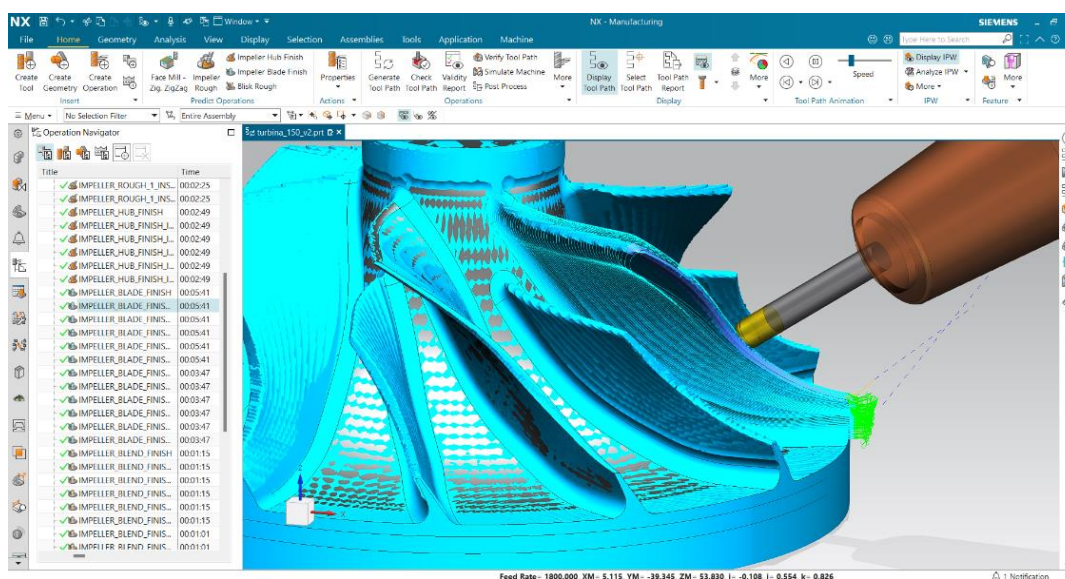
Com a expansão da manufatura enxuta (*lean manufacturing*) o OEE passou a ser largamente usado pelas empresas que adoraram esta filosofia de produção e ficou popular, sendo utilizado até por empresas que ainda não adotaram a produção enxuta. Uma das razões que ajudaram o OEE a ser largamente utilizado é por nos dizer, de forma simples e direta, quão efetivamente um equipamento foi utilizado, ou seja, quantos itens bons ele produziu, comparado com a quantidade de itens bons que o equipamento tem capacidade de produzir.

➤ Simulação e Prototipagem Virtual:

A utilização de simulações computacionais e prototipagem virtual, com base em teorias de modelagem e análise de processos de usinagem, possibilita testar diferentes estratégias antes da execução real (CORRER et al., 2018; FELIPE et al., 2020). Isso reduz riscos e contribui para a otimização do processo.

Através do CAM, torna-se viável programar estratégias de usinagem de acordo com as necessidades específicas. Essas estratégias podem ser simuladas, proporcionando a avaliação prévia de fatores cruciais, como a trajetória da ferramenta, a detecção de possíveis colisões, o tempo de processo, e outros indicadores relevantes. Caso a simulação não apresente resultados satisfatórios, é possível realizar ajustes na programação no ponto desejado e repetir a simulação, iterando essas correções até alcançar um cenário ideal. A Figura 9 exemplifica uma simulação de usinagem, destacando a trajetória da ferramenta, o tempo de cada processo e outras informações pertinentes.

Figura 9 - Simulação de usinagem de fresamento de turbina no NX CAM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

➤ Sistema de Refrigeração Adequado:

A escolha do sistema de refrigeração apropriado, baseada em teorias de transferência de calor, pode impactar na vida útil da ferramenta e na remoção eficiente do calor gerado durante a usinagem (BORDIN et al., 2014).

A eficiência da refrigeração exerce um impacto direto na eficácia global do processo de usinagem, resultando em taxas mais consistentes de remoção de material e na redução do risco de deformações térmicas nas peças. Além disso, a implementação de uma refrigeração eficiente desempenha um papel crucial na obtenção de acabamentos superficiais superiores, ao controlar a formação de cavacos e evitar o superaquecimento do material.

A prática generalizada de empregar sistemas específicos de refrigeração, sejam eles líquidos, ar comprimido ou utilizando o conceito de MQL (Mínima Quantidade de Fluido), para lidar com diversas composições de materiais e condições de usinagem é amplamente reconhecida. A seleção criteriosa desses sistemas é, por sua vez, um aspecto decisivo para o êxito da operação. O correto alinhamento entre as características dos materiais a serem usinados e os requisitos específicos de cada sistema de refrigeração é fundamental para garantir uma eficácia máxima, evidenciando a importância estratégica dessa decisão no contexto da usinagem moderna. Um exemplo de refrigeração baseado em óleo solúvel pode ser visualizado na Figura 10, aplicado na usinagem de um componente de turbina automotiva.

Figura 10 - Refrigeração Líquida direcionada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

2.2 Modelagens Avançadas e Simulações

Recentes avanços na otimização de processos de usinagem CNC têm incorporado técnicas avançadas de modelagem, com destaque para a simulação pelo MEF (Método dos Elementos Finitos). Silva et al. (2018) ressaltam que a simulação oferece uma compreensão aprofundada do comportamento térmico e mecânico durante a usinagem. Essa análise detalhada não apenas permite a identificação de potenciais pontos de melhoria, mas também serve como uma ferramenta valiosa para otimizar as condições de corte.

Além disso, a integração de tecnologias de Indústria 4.0, conforme discutido por Chen e Wang (2021), oferece oportunidades significativas para a otimização em tempo real. A coleta e análise de dados em tempo real possibilitam ajustes imediatos nos parâmetros de usinagem, maximizando a eficiência produtiva.

Embora técnicas avançadas de otimização, como simulação computacional e análises via Método dos Elementos Finitos (MEF), não tenham sido aplicadas diretamente nos resultados deste estudo, sua inclusão na fundamentação teórica é relevante por representar o estado da arte em usinagem CNC. Esses métodos permitem compreender limitações, tendências e possibilidades tecnológicas da área, servindo como referenciais conceituais que contextualizam o potencial de aprofundamento futuro e complementam a análise prática baseada no monitoramento digital realizado neste trabalho.

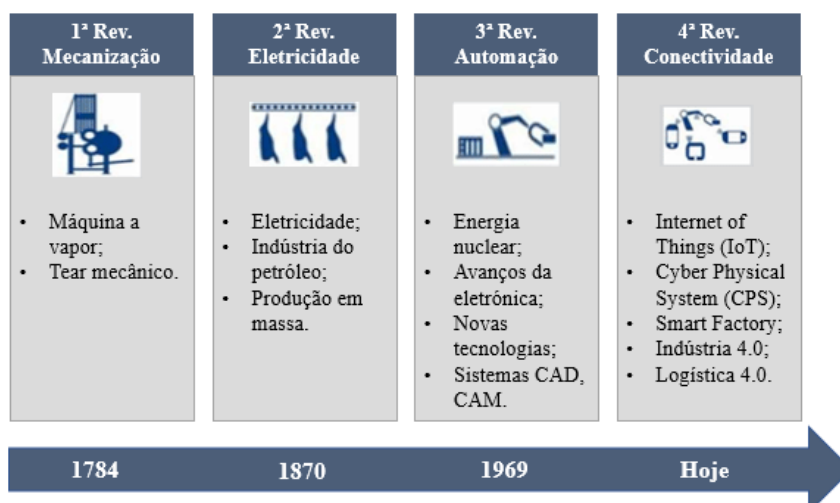
2.3 Indústria 4.0 e Otimização em Tempo Real

As revoluções industriais ao longo da história provocaram transformações profundas nos sistemas produtivos e na sociedade exercendo um impacto significativo no modo de vida, e após uma revolução substancial, nada permanece inalterado. Na Revolução Industrial, esse cenário não é exceção; ela surge com o propósito de aprimorar processos e elevar a lucratividade, desencadeando assim uma série contínua de transformações que perduram até os dias atuais.

A Primeira Revolução Industrial, entre 1760 e 1840, foi marcada pela introdução da máquina a vapor e pela mecanização da produção. A Segunda Revolução, de 1840 até o início do século XX, destacou-se pela eletrificação e pela produção em massa, baseada na especialização do trabalho. Já a Terceira Revolução Industrial, a partir da década de 1960, foi impulsionada pela automação, eletrônica e tecnologias da informação.

No início do século XXI, na Alemanha, surge a Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas, como Internet das Coisas (IoT), Big Data, inteligência artificial, computação em nuvem e sistemas ciber-físicos. Essa nova fase visa transformar os sistemas produtivos em ambientes inteligentes, conectados e autônomos (MILHOSSI, J. F.; QUEIROGA, A. P. G.; RODRIGUES, L. C., 2023). A Figura 11 ilustra a evolução dos parques fabris desde o século XVIII, evidenciando as diferentes etapas conhecidas como revoluções industriais.

Figura 11 - Etapas que marcaram as revoluções industriais

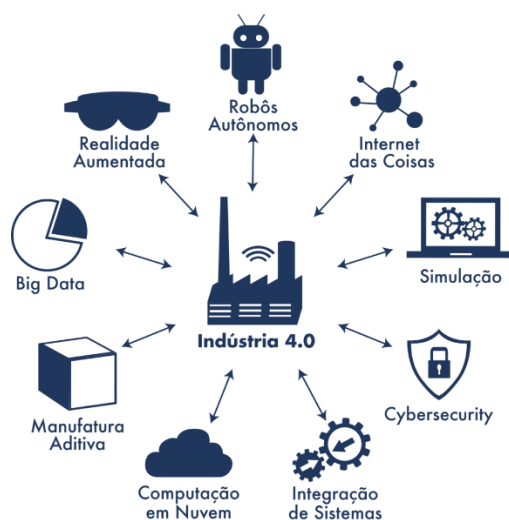


Fonte: MILHOSSI; QUEIROGA; RODRIGUES (2023)

Conforme mencionado anteriormente, a missão da Indústria 4.0 é transformar as fábricas em ambientes inteligentes, permitindo que operem com menos interrupções e gerenciem a complexidade dos processos. Nessa rede interconectada, os Sistemas Ciber-Físicos monitoram os processos físicos da fábrica para tomada de decisões. Quanto ao sistema físico em questão, ele se converte em um objeto de IoT, estabelecendo comunicação e colaboração em tempo real com outros sistemas físicos e pessoas por meio de uma rede wireless (MARR, 2016).

Segundo os Marr (2016), os sistemas ciber-físicos monitoram os processos físicos da fábrica e tomam decisões descentralizadas, comunicando-se em tempo real com outros sistemas e operadores humanos por meio de redes sem fio. De forma complementar, Rüßmann et al. (2015) apresentam os nove pilares tecnológicos que sustentam a Indústria 4.0, ilustrados na Figura 12, incluindo robótica avançada, simulação, integração de sistemas, IoT, segurança cibernética, computação em nuvem, manufatura aditiva, realidade aumentada e análise de dados.

Figura 12 - Os nove pilares da Industria 4.0



Fonte: Adaptado de Rüßmann et al. (2015).

A coleta contínua e a análise em tempo real de dados operacionais possibilitam ajustes instantâneos nos parâmetros de usinagem, maximizando não apenas a eficiência, mas também permitindo uma adaptação dinâmica a variações nas condições de trabalho.

Entre as ferramentas digitais utilizadas neste estudo destacam-se: sensores IoT, responsáveis pela coleta de dados operacionais em tempo real; gateways industriais, que realizam a conversão de protocolos (Modbus, OPC-UA) para

protocolos de rede (MQTT, HTTP), permitindo integração com sistemas digitais; plataformas de visualização, como Node-RED, que organizam os dados em dashboards customizados e intuitivos para facilitar a tomada de decisão; e módulos de monitoramento remoto, como o WISE-4050, que viabilizam a digitalização de máquinas CNC legadas sem necessidade de substituição. Segundo Correr et al. (2018), a integração entre monitoramento digital e práticas enxutas é essencial para reduzir perdas e aumentar a competitividade industrial. Essas ferramentas capturam informações críticas, como tempo de ciclo, paradas e status operacional, fornecendo base para decisões rápidas e alinhadas aos princípios da manufatura enxuta.

2.3.1 Dispositivos IoT para Coleta de Dados em Máquinas CNC

A coleta de dados em tempo real em ambientes industriais é um dos pilares da Indústria 4.0, sendo viabilizada por tecnologias como Internet das Coisas (IoT) e *Machine to Machine* (M2M). Essas tecnologias permitem que sensores instalados em máquinas capturem variáveis críticas como tempo de ciclo, vibração, temperatura, consumo energético e status operacional, transmitindo essas informações para plataformas de análise em nuvem ou locais.

Segundo Nascimento (2020), a aplicação de dispositivos IoT em sistemas embarcados industriais permite a geração de dados com alto potencial de valor, especialmente quando integrados a sistemas de análise e visualização em tempo real.

Esses dispositivos incluem sensores, microcontroladores e módulos de comunicação, como LoRa, Zigbee ou Wi-Fi industrial, sendo o WISE-4050¹ o modelo utilizado neste estudo e detalhado no capítulo seguinte.

Cansian (2022) destaca que a coleta e o tratamento de dados por dispositivos IoT devem considerar não apenas a eficiência operacional, mas também aspectos de segurança e privacidade, especialmente em ambientes industriais conectados.

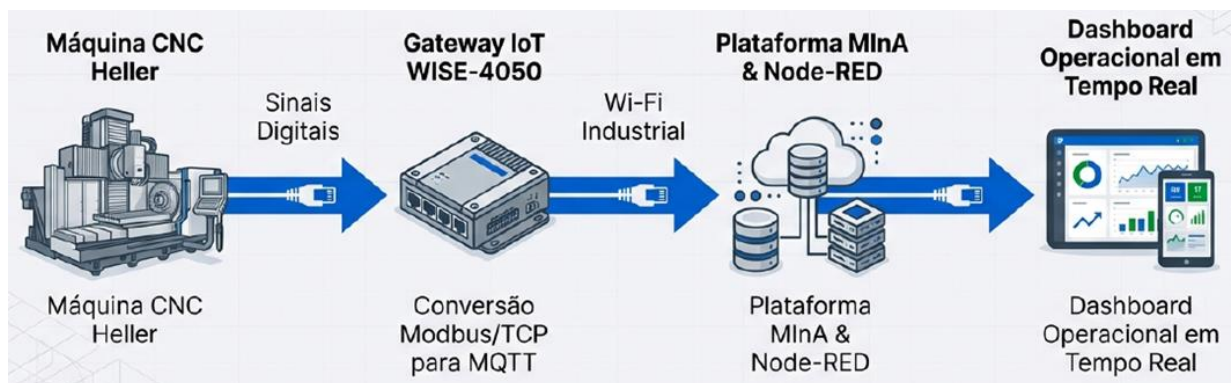
Os principais dispositivos utilizados para essa coleta incluem:

Sensores industriais inteligentes: como ilustrado pela Figura 13, a captura das informações operacionais ocorre por meio da leitura de sinais digitais gerados

¹ O dispositivo WISE-4050 pode ser consultado em na página oficial da Advantech, disponível em: https://www.advantech.com/pt-br/products/229f9f5b-d073-4cc2-ac54-d90147e04c12/wise-4050/mod_645b1bf7-82b2-4d6b-a381-b5848c29d0ab

pela máquina CNC. Esses sinais, provenientes dos sensores e dispositivos internos do equipamento, são encaminhados ao gateway IoT, que realiza a conversão dos dados para o protocolo MQTT e os transmite via rede Wi-Fi industrial. A plataforma em nuvem recebe, organiza e disponibiliza essas informações em dashboards operacionais em tempo real, permitindo acompanhar variáveis essenciais do processo.

Figura 13 - Integração entre a máquina CNC, o gateway IoT e a plataforma em nuvem para geração de dashboards operacionais em tempo real



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Módulos M2M (Machine to Machine): dispositivos compactos com conectividade 2G/3G/4G, Zigbee ou LoRa, que transmitem os dados dos sensores para sistemas de controle ou plataformas em nuvem. Exemplo ilustrado na Figura 14.

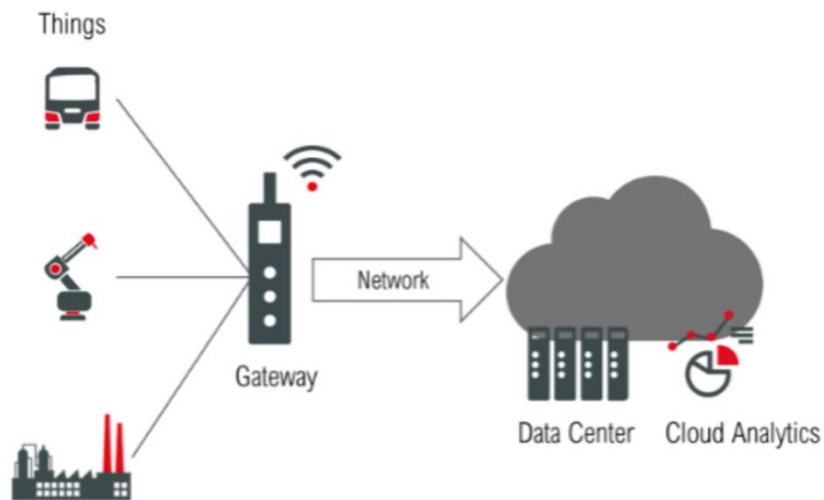
Figura 14 - Exemplo de módulo M2M



Fonte: M2M CONTROL (2025)

Gateways IoT industriais: convertem protocolos industriais (Modbus, OPC-UA) para protocolos de rede (MQTT, HTTP), permitindo a integração com sistemas MES e ERP. Um modelo de topologia é ilustrado na Figura 15.

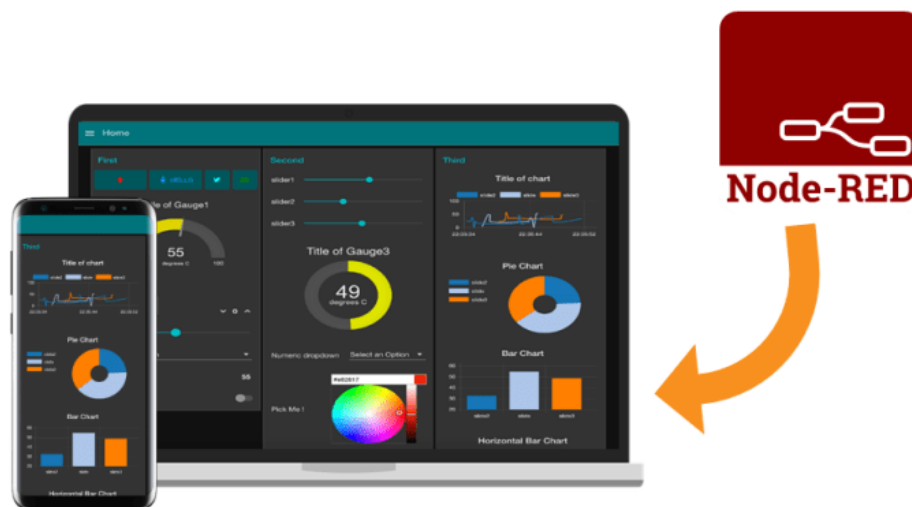
Figura 15 - Representação esquemática do papel do Gateway no sistema



Fonte: INTECH GROUP (2025)

Plataformas IoT low-code: permitem criar dashboards personalizados e realizar análises sem necessidade de programação avançada. Um modelo de interface é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de interface gráfica criada com Node-RED



Fonte: DIEN TU VIET (2025)

2.4 Desafios e Considerações Futuras na Otimização de Processos CNC

Apesar dos avanços recentes, a otimização de processos CNC ainda enfrenta desafios significativos que precisam ser considerados quando se busca elevar a eficiência produtiva de forma sustentável. Kim et al. (2019) destacam a complexidade inerente da usinagem, especialmente diante da variabilidade de materiais, geometrias e condições de corte, que exigem abordagens personalizadas e contínua adaptação. Tais aspectos reforçam a necessidade de pesquisa e desenvolvimento permanentes para aprimorar tecnologias, metodologias e ferramentas aplicadas à manufatura.

Além dos desafios operacionais clássicos, a adoção de tecnologias digitais associadas à Indústria 4.0 introduz um novo conjunto de considerações futuras. Um dos principais pontos diz respeito à segurança dos dados industriais, uma vez que dispositivos IoT, gateways e plataformas conectadas podem expor a planta a vulnerabilidades cibernéticas. A proteção das informações coletadas, especialmente dados sensíveis de produção e desempenho, exige infraestrutura de rede robusta, criptografia adequada, políticas de acesso bem definidas e práticas de segurança compatíveis com o ambiente industrial. Falhas nesses mecanismos podem comprometer não apenas a integridade das informações, mas também a confiabilidade das decisões baseadas em dados.

Outro desafio relevante está associado aos custos de manutenção e atualização dos sistemas IoT. Embora a aplicação de soluções de monitoramento digital seja, muitas vezes, relativamente acessível em sua implantação inicial, a manutenção contínua pode representar investimentos adicionais — como substituição de dispositivos, calibração, suporte técnico, estabilidade da rede sem fio e atualização de softwares. Ambientes industriais tradicionais, sujeitos a vibração, abrasão, partículas e oscilações térmicas, frequentemente demandam manutenção preventiva mais rigorosa para garantir o funcionamento adequado dos dispositivos digitais.

A obsolescência tecnológica também constitui uma preocupação crescente nas aplicações de digitalização industrial. Protocolos de comunicação, dashboards, API (Interface de Programação de Aplicações) e plataformas de análise são atualizados continuamente, podendo gerar incompatibilidade com hardware mais antigo ou mesmo descontinuação de soluções pelo fabricante. Esse cenário exige planejamento estratégico para garantir que tecnologias adotadas hoje possam ser mantidas,

integradas ou substituídas no médio e longo prazo, evitando riscos de dependência tecnológica e garantindo continuidade operacional.

Por fim, a integração entre tecnologias digitais e práticas tradicionais de otimização CNC exige atenção crescente à capacitação das equipes. A adoção de sistemas ciberfísicos e ferramentas de análise em tempo real demanda novos perfis profissionais e maior desenvolvimento de competências em análise de dados, manutenção de soluções digitais e interpretação de indicadores de eficiência. Empresas que não possibilitam essa evolução podem enfrentar dificuldades na sustentação de melhorias.

Dessa forma, embora o avanço das tecnologias IoT e das soluções de monitoramento em tempo real represente um caminho promissor para elevar a eficiência produtiva, a consolidação dessas práticas requer ações estruturadas relacionadas à segurança da informação, gestão de custos, atualização tecnológica e desenvolvimento de competências humanas. Esses aspectos constituem importantes campos de exploração futura para ampliar a robustez, a confiabilidade e a escalabilidade das soluções de otimização aplicadas aos processos CNC.

2.4.1 Máquinas CNC versus Indústria 4.0

De acordo com Couto (2019), as máquinas CNC, passarão, com a integração e conexão, a reportar o que ela está fazendo em tempo real, qual a sua eficiência, se está sendo bem ou mal utilizadas, que grau de qualidade ela consegue produzir, diagnósticos antecipados de problemas para manutenção preditiva e preventiva através de alarmes de aviso, anomalia no processo, apresentando o motivo de máquina ociosa, garantindo seu funcionamento próximo do tempo disponível programado.

Uma forma de poder garantir qualidade na fonte, respeitado os limites de capacidade, pode ser utilizado por exemplo, um sistema de medição através de apalpador, incorporado ao processo, ilustrado na Figura 17 destacado com o marcador. Com isto é possível gerar gráficos de qualidade, garantindo a precisão e a repetibilidade, uma vez que este recurso pode corrigir uma ferramenta caso a geometria usinada esteja fora dos padrões dimensionais.

Figura 17 - Apalpador RENISHAW OMP60 em um Centro de Usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Embora a máquina CNC tenha nascido dentro desses fundamentos, ainda muitas variáveis que conferem flexibilidade às máquinas são mal administradas e equacionadas. Em pleno século XXI, as máquinas não estão conectadas com um sistema CAD/CAM/DNC²/MES³, são poucas empresas que esboçam esta utilização, outras estão piores ainda, os programas são executados no “pé” da máquina redundando em muitas horas de máquinas paradas diária, semanal, mensal e anual.

2.5 Ferramentas da Qualidade

No contexto da manufatura enxuta, diversas ferramentas estruturadas foram utilizadas neste estudo para apoiar a identificação das causas e o planejamento das ações de melhoria. O diagrama de Ishikawa permite organizar sistematicamente as possíveis origens de um problema, enquanto a técnica dos 5 Porquês aprofunda a

² DNC significa *Direct Numeric Control* ou Controle Numérico Direto é um programa de comunicações que enviam os programas em códigos ISO diretamente à memória de máquinas de usinagem conforme a solicitação dos comandos programados.

³ MES significa *Manufacturing Execution Systems* ou Sistema de Execução da Manufatura que é uma ferramenta voltada para processos industriais, conectando e otimizando o fluxo de informações entre o chão de fábrica e a gestão.

investigação até a identificação da causa raiz, ambas amplamente reconhecidas na literatura Lean desde os trabalhos de Shingo (1989). Para o planejamento das contramedidas, empregou-se o método 5W2H, que estrutura ações ao definir o que será feito, por que, onde, quando, por quem, como e com qual custo, proporcionando clareza e rastreabilidade. A ferramenta A3, também associada ao pensamento Lean, organiza a resolução de problemas de forma visual e iterativa, conectando diagnóstico, análise e verificação, conforme preconizado por Shingo (1989). No que se refere à redução de desperdícios relacionados a tempos de ajuste, o método SMED — conforme discutido por Correr et al. (2018) — contribui diretamente para a diminuição das perdas por setup e paradas. Além disso, o OEE, fundamentado nos trabalhos clássicos de Nakajima (1988), fornece a base teórica para avaliar disponibilidade, performance e qualidade do equipamento. A utilização integrada dessas ferramentas, amplamente consolidadas na literatura, estabelece o embasamento conceitual que sustenta as análises realizadas ao longo desta pesquisa e reforça a coerência entre teoria e prática na avaliação do processo produtivo.

3 METODOLOGIA

A empresa utilizada para estudo de caso no desenvolvimento deste trabalho, optou-se por uma abordagem mista, que combina técnicas qualitativas e quantitativas, estruturada a partir de um estudo de caso único aplicado. Esta escolha visa proporcionar uma análise aprofundada e realista dos fenômenos observados, levando em consideração não apenas os dados numéricos coletados, mas também as especificidades organizacionais e operacionais que influenciam diretamente o desempenho produtivo.

Este capítulo apresenta a abordagem metodológica adotada para a realização desta pesquisa, cujo objetivo principal é analisar o impacto da aplicação de estratégias de digitalização e monitoramento em tempo real sobre a eficiência produtiva em ambientes industriais de usinagem CNC. A metodologia foi construída com base em consultorias realizadas pelo SENAI-MG, do programa A³ – “Alavancagem de Alianças para o Setor Automotivo”, em empresas do setor automotivo que enfrentam desafios similares em seus processos fabris, especialmente relacionados a paradas não planejadas, baixa rastreabilidade e ausência de dados consolidados para tomada de decisão. O autor deste trabalho participou diretamente da consultoria na empresa objeto de estudo, atuando na implementação das soluções de digitalização e monitoramento, bem como no acompanhamento dos resultados obtidos.

Sobre o Programa ROTA 2030, trata-se de uma iniciativa do governo federal para o setor automotivo brasileiro, criada pela Lei nº 13.755/2018, que visa estimular a indústria automotiva por meio de incentivos fiscais e metas de inovação, pesquisa e desenvolvimento (P&D). Em conjunto com o Programa A³ (Alavancagem de Alianças para o Setor Automotivo) do SENAI, entre 2019 e 2024 foram realizadas 31 consultorias em Minas Gerais, atendendo mais de 20 empresas metalmeccânicas do setor automotivo na categoria *Hands-on*, que incentiva o “aprender fazendo”. Essa ação beneficia a indústria ao aplicar conhecimentos práticos em manufatura enxuta, digitalização e gestão de riscos, alinhados aos conceitos da Indústria 4.0.

O objetivo dos programas Rota 2030 e A³ é fortalecer a competitividade da cadeia automotiva por meio de ganhos em produtividade e da aplicação dos conceitos da Indústria 4.0, especialmente pela digitalização e integração dos processos industriais.

Nesse contexto, o SENAI atua como parceiro estratégico por meio do programa A³ – *Alavancagem de Alianças para o Setor Automotivo*. Esse programa direciona

recursos de empresas apoiadoras para projetos de inovação tecnológica voltados à modernização e eficiência produtiva do setor.

As iniciativas são executadas na Plataforma SENAI de Inovação para a Indústria, que organiza os projetos em três modalidades: Hands-On, voltada para aplicação prática em chão de fábrica; Empreendedorismo por meio de Desafios, que estimula soluções inovadoras para problemas específicos; e Empreendedorismo por meio de Alianças, que promove parcerias estratégicas entre empresas e instituições. Todas as modalidades possuem fluxo contínuo de participação, condicionado à disponibilidade de recursos.

3.1 Caracterização da Pesquisa e Contexto do Estudo de Caso

A pesquisa foi realizada em uma empresa do setor de usinagem de componentes automotivos, localizada na cidade de Vespasiano, estado de Minas Gerais. Em função do acordo de confidencialidade firmado, a empresa será identificada neste trabalho como A_XXXXX.

Todas as informações obtidas foram provenientes de fontes autorizadas e formalizadas em relatórios do SENAI-MG. Os dados da empresa foram anonimizados, garantindo o cumprimento dos termos de confidencialidade e preservando os interesses estratégicos da organização. Além disso, todas as intervenções respeitaram a rotina produtiva, não causando interferências nos ciclos operacionais, assegurando que a metodologia refletisse as condições reais da indústria observada. A Figura 18 apresenta a área de produção da empresa A_XXXXX, onde o estudo foi conduzido

Figura 18 - Área de produção da empresa A_XXXXX



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Empresa A_XXXXX LTDA

A empresa é uma multinacional líder em soluções de *lightweighting* (redução de peso) para a indústria automotiva, com atuação consolidada em mais de sete países, incluindo o Brasil. Reconhecida como maior fabricante global de knuckles (juntas) de alumínio e *subframes* (subquadros), opera com tecnologia de fundição, usinagem e montagem integrada, suportada por laboratórios de teste rigorosos e ciclos de desenvolvimento ágeis, capazes de concluir projetos em até 24 horas.

A planta localizada em Vespasiano/MG, foco deste estudo, conta com 32 centros de usinagem CNC da marca HELLER, modelo MC 4500, configurados com 4 eixos e projetados para operações de alta precisão e robustez. O MC 4500 é um centro de usinagem horizontal desenvolvido para aplicações flexíveis em tarefas complexas. Possui *spindle* de 38 kW, torque máximo de 242 Nm e rotação de até 10.000 rpm. O magazine armazena 50 ferramentas, compatíveis com cones BT 50.

Os cursos dos eixos X, Y e Z são de 800 mm, com avanço rápido de 60 m/min. Os paletes possuem dimensões de 500 x 630 mm e capacidade de carga de até 1.400 kg. A máquina conta com trocador de paletes integrado e pode ser equipada com comando numérico Fanuc 31i-B, possibilitando integração com sistemas digitais.

Apesar do elevado nível tecnológico das máquinas, a ausência de um sistema de monitoramento digital dedicado resultava em paradas frequentes, baixa rastreabilidade dos processos e dificuldade na tomada de decisão baseada em dados. Esse cenário evidencia a necessidade de integração entre sistemas físicos e digitais, tornando-se um ambiente propício para a aplicação das estratégias propostas neste trabalho, alinhadas aos conceitos da Indústria 4.0.

Descrição do processo produtivo: A empresa A_XXXXX realiza a usinagem de peças que compõem a estrutura dos veículos, como o montante da articulação da direção, junta frontal e junta pescoço de ganso, entre outras. Por se tratar de um processo predominantemente automatizado, as principais causas de paradas das máquinas estão relacionadas à necessidade de ajustes, manutenções e trocas de ferramentas utilizadas na usinagem.

A pesquisa realizada neste trabalho pode ser classificada sob diversos aspectos, conforme a tipologia científica:

- **Quanto à natureza:** trata-se de uma pesquisa aplicada, pois busca resolver problemas concretos identificados nas empresas-alvo, com foco na melhoria da eficiência operacional por meio da implementação de tecnologias digitais.
- **Quanto à abordagem:** é uma pesquisa qualitativa e quantitativa (mista), uma vez que combina a descrição e interpretação de fenômenos (paradas, causas, fluxo de trabalho) com a análise de dados numéricos (indicadores como produtividade, tempo de parada e OEE).
- **Quanto aos objetivos:** é uma pesquisa exploratória, pois visa entender de forma aprofundada os fatores que influenciam a eficiência de processos de usinagem sob o ponto de vista da digitalização industrial e da Indústria 4.0.
- **Quanto aos procedimentos técnicos:** utiliza o estudo de caso aplicado em uma empresa de médio porte do setor automotivo situada em Vespasiano/MG.

3.2 Classificação da pesquisa e etapas do desenvolvimento

A metodologia adotada teve como premissa a análise da usinagem de peças metálicas em máquinas CNC. A empresa foi atendida por programas de consultoria do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI-MG), no eixo temático de Digitalização e Manufatura Inteligente, com foco na coleta e monitoramento de dados de produção em tempo real.

As estratégias utilizadas na consultoria serviram como base empírica para a pesquisa e envolveram as seguintes frentes de trabalho:

- Levantamento e análise dos fluxos de produção;
- Identificação preliminar dos principais pontos críticos do processo (gargalos e fontes de perda);
- Implementação de dispositivos de monitoramento em tempo real nas máquinas CNC;
- Estruturação de painéis digitais (dashboards) com indicadores como tempo de ciclo, paradas e taxa de utilização dos recursos;
- Capacitação da equipe operacional para a correta classificação e interpretação dos dados;
- Avaliação dos resultados ao longo do período de acompanhamento.

Para garantir clareza e sistematização, essas ações foram organizadas em cinco etapas sequenciais, apresentadas a seguir:

Etapas 1 – Diagnóstico Inicial

Visitas técnicas para compreender o cenário produtivo, levantamento da estrutura dos centros de usinagem, turnos operacionais, tipos de peças e desafios enfrentados por gestores e operadores.

Etapas 2 – Coleta de Dados Pré-Implementação

Coleta de dados sobre produtividade, taxa de utilização, tempo de parada e causas associadas, utilizando entrevistas e registros manuais devido à ausência de sistema digital.

Etapas 3 – Implantação das Tecnologias

Definição dos pontos críticos do processo e instalação do dispositivo de monitoramento, integração com sistemas digitais (dashboards) e estruturação de rotinas de acompanhamento.

Etapas 4 – Acompanhamento dos Resultados

Monitoramento por um período de 38 dias distribuídos em 6 meses (outubro, novembro, dezembro/2022, janeiro, abril e maio/2023), ajustes operacionais com base nos dados (fevereiro e março/2023), registro das paradas em tempo real e uso das informações em reuniões de produção.

Etapas 5 – Avaliação Pós-Implementação

Comparação dos resultados antes e depois das intervenções, considerando indicadores como:

- Produtividade (produção/hora-homem);
- Disponibilidade (tempo efetivo de máquina ligada);
- OEE (Overall Equipment Effectiveness);
- Frequência e duração de paradas.

3.3 Recursos

A coleta de dados foi realizada por meio de sistemas de monitoramento em tempo real, com sensores instalados diretamente nas máquinas CNC que, em função da parceria firmada entre empresas e SENAI, aplicou-se o seguinte dispositivo **WISE-4050**.

O WISE-4050, ilustrado na Figura 19, foi empregado neste estudo como gateway IoT responsável pela coleta dos sinais digitais da máquina CNC e pela transmissão desses dados via MQTT para a plataforma de monitoramento. Sua escolha deve-se à compatibilidade com máquinas legadas, à facilidade de integração e ao baixo impacto no processo produtivo, características que o tornam adequado para aplicações de retrofit em ambientes industriais.

Em vez de explorar suas especificações técnicas completas, o presente estudo concentra-se na sua função prática: capturar eventos discretos do processo, como estado de operação, execução de ciclos e ocorrências de parada. Esse arranjo de medição é suficiente para comparar o comportamento da máquina antes e depois das intervenções, embora apresente limitações inerentes ao uso de sinais discretos. Entre as principais incertezas, destacam-se a dependência da estabilidade da rede sem fio, possíveis ruídos elétricos que podem gerar pulsos falsos e a impossibilidade de registrar grandezas analógicas, como vibração e temperatura.

Apesar dessas restrições, o método mostrou-se adequado ao objetivo da pesquisa, pois o ambiente permaneceu controlado e as mesmas condições de medição foram mantidas nos dois períodos analisados, mitigando vieses e permitindo avaliar com consistência o impacto das intervenções no desempenho da máquina.

Figura 19 - WISE-4050



Fonte: Advantech (2024)

Além da coleta de dados realizada pelo dispositivo WISE-4050, foi utilizada a plataforma MInA – Minha Indústria Avançada⁴, uma solução desenvolvida para apoiar pequenas e médias empresas na transição para a Indústria 4.0. Essa plataforma permite o acompanhamento da produção em tempo real, fornecendo indicadores operacionais que auxiliam na avaliação da eficiência de máquinas e processos.

O funcionamento do MInA baseia-se na coleta de dados provenientes de sensores instalados nos equipamentos, como os conectados ao WISE-4050. Esses dados são transmitidos para a plataforma, que os organiza em dashboards e relatórios visuais. Com isso, a gestão passa a ter acesso rápido e preciso a informações como tempo de ciclo, paradas, disponibilidade e produtividade, o que facilita uma tomada de decisão mais ágil, assertiva e baseada em dados reais do chão de fábrica. A Figura 20 mostra a interface da plataforma MInA, utilizada para monitoramento em tempo real.

Figura 20 - Tela de interface do MInA



Fonte: MInA – Minha Indústria Avançada (2025)

Além do dispositivo WISE-4050 utilizado neste estudo, existem outras soluções disponíveis no mercado, como:

- **FANUC MT-LINKi** (monitoramento integrado para máquinas CNC FANUC);
- **Siemens SIMATIC IoT2040** (gateway para integração IoT industrial);

⁴ MInA – Minha Indústria Avançada: Programa desenvolvido pelo SENAI em parceria com o SEBRAE para apoiar pequenas e médias indústrias na jornada de transformação digital. Consiste em uma plataforma de monitoramento em tempo real que integra dados coletados por dispositivos IoT, como o WISE-4050, e os apresenta em dashboards e relatórios. Não é um módulo do WISE, mas uma ferramenta complementar que utiliza esses dados para gerar indicadores de desempenho e apoiar decisões estratégicas. Fonte: <https://portal.mina.com.br>.

- **Beckhoff IloT** (plataforma para conectividade e análise);
- **Softwares de supervisão** como CNCnetPDM e Grafana + InfluxDB.

Além dessas soluções, existem ainda ferramentas internas como dashboards digitais, formulários complementares e planilhas para análise de indicadores. Essas alternativas podem ser consideradas em projetos diversos, dependendo da infraestrutura tecnológica e do nível de integração desejado.

3.4 Limitações da Pesquisa

- A pesquisa foi limitada a uma empresa e a um período específico de intervenção.
- O dispositivo utilizado na coleta de dados na consultoria foi definido pelo SENAI.
- Embora fatores externos, como demanda, absenteísmo e manutenções corretivas, pudessem influenciar os resultados, durante o período analisado esses elementos permaneceram estáveis, reduzindo significativamente seu impacto sobre as medições.

A replicabilidade dos métodos depende do grau de maturidade tecnológica de cada empresa, mas não é fator decisivo, uma vez que já existe tecnologia de monitoramento inclusive para máquinas convencionais.

3.5 Cálculo dos Indicadores de Desempenho

Para a análise dos resultados, foram utilizados os principais indicadores que compõem o OEE, além da produtividade por hora-homem. A seguir, são descritas as fórmulas e critérios utilizados para o cálculo de cada um extraídos da Tabela 1:

➤ Produtividade

Mede a quantidade de peças boas produzidas por operador em uma hora de trabalho. A unidade em **peças/hh** (peças por hora-homem).

$$Produtividade = \frac{Produção\ Boa}{Número\ de\ Operadores \times Horas\ por\ Turno}$$

Vejamos como ficaria no cenário onde, durante um turno de 7 horas, um operador produziu 57,3 peças boas.

Aplicando os dados: Produção boa = 57,3 peças; Número de operadores = 1; Horas por turno = 7.

$$Produtividade = \frac{57,3}{1 \times 7} = 8,18571 \cong 8,18$$

Logo, o operador produziu, em média, 8,18 peças boas por hora de trabalho. Esse valor é usado para comparar o desempenho antes e depois das intervenções de otimização.

➤ Disponibilidade

Reflete o tempo em que a máquina esteve efetivamente operando em relação ao tempo total disponível. Unidade **adimensional** (valor entre 0 e 1).

$$Disponibilidade = \frac{Tempo\ de\ Operação}{Tempo\ total\ planejado}$$

No cenário em que o turno tem 7 horas e a máquina ficou parada por 0,235 horas, o tempo de operação foi 6,765 horas. Assim:

$$Disponibilidade = \frac{6,765}{7} = 0,9664 = \mathbf{96,64\%}$$

➤ Performance

Avalia se a produção ocorreu na velocidade esperada, considerando o tempo de ciclo ideal. Unidade **adimensional** (valor entre 0 e 1).

$$Performance = \frac{Produção\ Real \times Tempo\ de\ ciclo\ ideal}{Tempo\ de\ operação}$$

Observação: Como o tempo de ciclo ideal nem sempre está disponível, muitas empresas utilizam a performance como:

$$Performance = \frac{Produção\ Real}{Produção\ teórica}$$

No cenário em que a produção teórica esperada fosse, por exemplo, 59,29 peças, mas a produção real foi de 57,3 peças. Teremos o seguinte resultado:

$$Performance = \frac{57,3}{59,29} = 0,9664 = \mathbf{96,64\%}$$

➤ **Qualidade**

Avalia a proporção de peças boas em relação ao total produzido. Unidade **adimensional** (valor entre 0 e 1).

$$Qualidade = \frac{Produção\ boa}{Produção\ total}$$

No cenário em que houve uma produção de 57,3 peças e 0 peças foram refugadas, obtemos:

$$Qualidade = \frac{57,3}{57,3} = 1,0$$

➤ **OEE**

É o produto dos três indicadores anteriores e representa a efetividade global do equipamento. Unidade em **percentual**.

$$OEE = Disponibilidade \times Performance \times Qualidade$$

Com os dados dos exemplos temos:

$$OEE = 0,9664 \times 0,9664 \times 1 = 0,9339 = \mathbf{93,39\%}$$

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação das estratégias de otimização de processos de usinagem CNC e digitalização industrial na empresa A_XXXXX, com base em dados reais coletados antes e depois das intervenções. A análise é estruturada em três níveis: quantitativo, qualitativo e comparativo, permitindo uma avaliação abrangente dos impactos gerados.

4.1 Análise Quantitativa Indicadores de Desempenho da empresa A_XXXXX:

4.1.1 Medições iniciais

Para a realização da aquisição de dados, foi instalado o dispositivo WISE-4050, como pode ser visto na Figura 21, de modo a proporcionar o monitoramento na máquina HELLER 07 com os seguintes parâmetros: Canal 0 monitorando o estado de máquina por ausência de produção e no Canal 1 realizando a contagem de peças por rotina de programação executada na finalização do processo de usinagem.

Figura 21 - Instalação do WISE-4050 na máquina de usinagem HELLER



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A intervenção foi realizada na linha de produção destinada ao modelo Jeep Commander, escolhida por ser composta por equipamentos considerados críticos para a eficiência global da fábrica. A seleção dessa linha teve como objetivo viabilizar a digitalização dos dados operacionais, permitindo a obtenção de informações em tempo real para aumentar a produtividade e a eficiência dos processos. A família de produto contemplada pela intervenção foi o Projeto Montante 598, caracterizado por um tipo de produção contínuo, o que reforça a necessidade de monitoramento constante e estratégias de otimização para garantir estabilidade e desempenho do processo.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir da medição inicial na máquina definida juntamente com a equipe da empresa.

Tabela 1 - Medições iniciais da empresa A_XXXXX

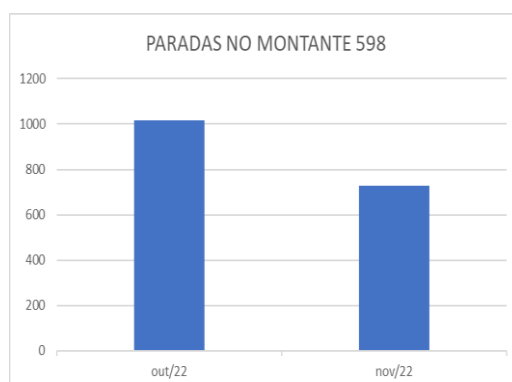
Indicador	Quantidade	Unidade
Operadores por turno antes da intervenção	1	Operadores
Horas por turno	7	Horas
Horas de paradas de produção	0,23	Horas
Tempo de operação	6,76	Horas
Produção possível nas horas trabalhadas por turno	59,29	Produção por turno
Produção realizada nas horas trabalhadas por turno	57,3	Produção por turno
Produção não conforme (refugada/retrabalhada)	0	Produção refugada/retrabalhada por turno
Produção boa	57,3	Produção boa por turno
Produtividade (medição inicial)	8,19	Produção/hh
OEE (medição inicial)	93,39%	%
Disponibilidade (medição inicial)	0,9664	Adimensional
Performance (medição inicial)	0,9664	Adimensional
Qualidade (medição inicial)	1	Adimensional

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.1.1 Contextualização do Processo e Gargalos Produtivos

No processo de produção do Montante 598 traseiro, as intervenções nas ferramentas figuram atualmente como uma das principais causas de paradas não planejadas. Esse cenário resulta em ajustes frequentes, que demandam atenção constante das equipes de produção e ferramentaria. Verificou-se que o rendimento efetivo de determinadas ferramentas estava aquém do projetado, ocasionando um elevado número de intervenções corretivas e, por consequência, aumentando o tempo total de parada das máquinas e reduzindo a eficiência do processo produtivo. A Figura 22 ilustra o tempo total registrado referente as paradas para troca e ajustes das ferramentas desgastadas ou quebradas durante a usinagem.

Figura 22 - Paradas registradas em segundos no processo Montante 598



Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.1.2 Condições atuais

Devido às características específicas do processo de usinagem, constatou-se que uma das ferramentas apresentava desgaste acelerado, provocando paradas recorrentes e necessidade de ajustes sucessivos. Essa condição impactava diretamente o tempo de ciclo, que se tornava superior ao previsto na concepção do processo. Essa situação pôde ser verificada a partir dos dados consolidados pelo sistema de apontamento desenvolvido em parceria com a empresa, ilustrados pelas Figuras 23 e 24, utilizando recursos do Power Apps e Power Automate, que permitiram também gerar indicadores como o MTBF (*Mean Time Between Failures*) e gráficos de intervalo entre as ocorrências de parada, Figura 25. O indicador MTBF, ou Tempo Médio Entre Falhas, é amplamente utilizado na engenharia de manutenção para

mensurar a confiabilidade de equipamentos e sistemas produtivos. Ele representa o tempo médio de operação de um ativo até a ocorrência de uma falha, sendo essencial para o planejamento de manutenções preventivas e preditivas. Segundo Lopes e Silva (2011), “o MTBF é uma métrica fundamental para avaliar a confiabilidade de sistemas industriais, permitindo a identificação de gargalos operacionais e a melhoria contínua dos processos produtivos”. Dessa forma, o uso adequado do MTBF contribui diretamente para o aumento da disponibilidade dos ativos e a redução de custos operacionais.

$$MTBF = \frac{\text{Tempo Total de Funcionamento}}{\text{Número de Falhas}}$$

Tempo Total de Funcionamento:

É o tempo total em que o equipamento ou sistema esteve em operação, excluindo os períodos de parada não planejada.

Número de Falhas:

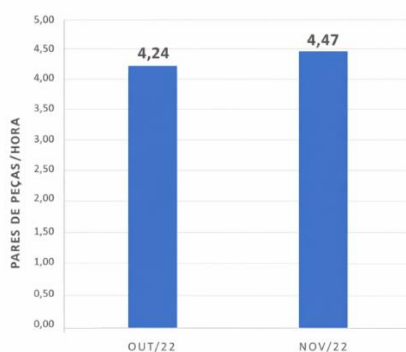
É a quantidade de vezes que o equipamento ou sistema falhou durante o período de análise.

Exemplo: Se um equipamento funcionou por 1000 horas e apresentou 2 falhas durante esse período, o MTBF seria:

$$MTBF = \frac{1000 \text{ Horas}}{2 \text{ Falhas}} = 500 \text{ Horas}$$

Isso significa que, em média, o equipamento leva 500 horas para falhar.

Figura 23 - Pares de peças por hora



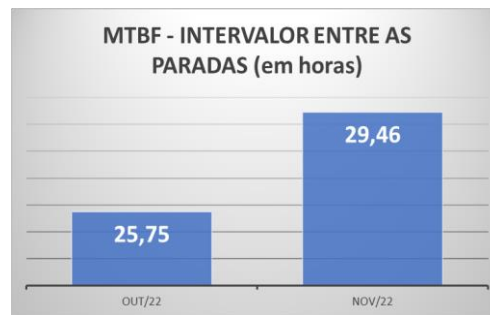
Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Figura 24 - Tempo de ciclo médio por par de peças



Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Figura 25 - MTBF nos meses de análise



Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.1.3 Metas e objetivos

Este trabalho estabeleceu como metas principais:

- Reduzir o volume de intervenções e o tempo de parada decorrente do desgaste das ferramentas;
- Aumentar a disponibilidade operacional do centro de usinagem HELLER 07;
- Elevar a produção efetiva da célula produtiva;
- Alcançar um ganho mínimo de 10% na produtividade global do processo.

4.1.1.4 Análise

Para o levantamento e compreensão das causas fundamentais dos problemas observados, foram aplicadas ferramentas de análise estruturada, com destaque para o diagrama de Ishikawa (Figura 26) e a metodologia dos 5 Porquês (Figura 27). Essas abordagens permitiram identificar e hierarquizar as principais origens das falhas, contribuindo para direcionar as contramedidas propostas.

Figura 26 - Diagrama de Ishikawa empresa A_XXXXX



Fonte: Adaptado pelo autor de Relatório da consultoria, 2025

Figura 27 - Metodologia dos 5 Porquês empresa A_XXXXX

Nº	PROBLEMA	1º Porquê (por que o fato ocorre?)	2º Porquê (por que 1º Fato ocorre)	3º Porquê (por que 2º Fato ocorre)	4º Porquê (por que 3º Fato ocorre)	5º Porquê - CAUSA RAIZ (por que 4º Fato ocorre)
1	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	Desgaste excessivo da ferramenta T571	Propriedade mecânica do ferro fundido usinado	Rangers de tolerância da propriedade mecânica no limite do especificado	Dentro do especificado pela Engenharia do Cliente	
2	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	Desgaste excessivo da ferramenta T571	Tempo de usinagem da ferramenta alto	Conceito do dispositivo e da peça não permite passagem de uma ferramenta maior	Replicado de outros projetos similares	
3	Ausência de procedimento de troca de ferramentas no posto de trabalho	Não tem estrutura física para executar este procedimento	Falta de confiabilidade na execução dessa tarefa pelo operador	Receio de gerar peças não conforme no processo	Não foi estimulado um treinamento para essa tarefa	Nunca foi implementado
4	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Não há refrigeração nas ferramentas de corte para fresamentos (571)	Diminuição na performance de vida útil dos fresamentos	Não atende as condições do processo atual	Aumento do custo peça	

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.1.5 Contramedidas

As primeiras ações definidas a partir das análises consistiram em desmembrar o processo de usinagem associado à ferramenta T571, que foi identificada como a principal responsável pelos índices elevados de paradas não planejadas e quebras. Além dessa reconfiguração, foram desenvolvidas atividades voltadas à implantação da manutenção autônoma, com foco na melhoria das condições do equipamento e na prevenção de falhas recorrentes. Todas estas ações foram inseridas no método 5W2H, que é uma ferramenta de planejamento que organiza qualquer ação respondendo sete perguntas básicas: o que será feito, por que, onde, quando, quem faz, como será feito e quanto custa. Com isso, garantimos clareza, objetivo e execução sem falhas. O 5W2H desenvolvido é apresentado na Figura 28 de forma completa e ampliado nas Figuras 29 e 30 para melhor visualização e compreensão do leitor.

Figura 28 - Método 5W2H para gestão da resolução dos problemas identificados na Empresa

A_XXXXX

Nº	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	O que	Como	PESSOA 1	PESSOA 2	PESSOA 3	Início	Fim	Onde	Por que	Quanto R\$	Progresso %	ATRASADO	STATUS	PRIORIDADE
1	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	teste com amostra de dureza controlada	realizar reunião para solicitar lote selecionado quanto a dureza com a metalúrgica	Alexandre Estanislau	Wenilton Oliveira		22/11/2022	13/12/2022	HELLER 07	Verificar a dureza se está interferindo no desempenho das ferramentas.	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
2	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	teste com amostra de dureza controlada	realizar a produção do lote controlado	Anderson Oracio			08/01/2023	15/03/2023	HELLER 07	Verificar a dureza se está interferindo no desempenho das ferramentas	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
3	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	teste com amostra de dureza controlada	acompanhar item em produção durante o teste de usinagem	Anderson Oracio	Felipe Lacerda	Fidel Montano	15/03/2023	18/04/2023	HELLER 07	Verificar a dureza se está interferindo no desempenho das ferramentas	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
4	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	desmembrar o processo de usinagem da T571	implementando uma ferramenta as etapas do processo em tentativa	Fidel Montano			17/01/2023	14/04/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
5	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno. (há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	desmembrar o processo de usinagem da T571	acompanhar melhoria de desmembramento das ferramentas no bloco	Anderson Oracio	Felipe Lacerda		14/04/2023	31/05/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
6	Ausência de procedimento de troca de ferramentas no posto de trabalho	disponibilizar ferramenta reserva no posto de trabalho	adquirir os componentes para compor a ferramenta gêmea	Fidel Montano			31/05/2023	20/06/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
7	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	realizar limpeza adequada das ferramentas	fazer o levantamento do espaço adequado para execução da limpeza	Felipe Lacerda	Anderson Oracio		17/01/2023	31/01/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
8	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Definição do setor piloto, diagnóstico e cronograma de implementação	Walter	SENAI	Sergio	04/10/2023	14/12/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
9	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Treinamento	SENAI			07/09/2023	25/04/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
10	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Implementação no equipamento escolhido Heller 7 que está com o montante 3885	Walter	Sergio	SENAI	25/04/2023	06/06/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	100%	NÃO	FEITO	0
11	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Acompanhamento dos cartões abertos e acompanhamento dos	Walter	Sergio	SENAI	06/06/2023	27/06/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	75%	NÃO	FAZENDO	0

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Figura 29 - Recorte 1 do 5W2H

Nº	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	O que	Como	PESSOA 1	PESSOA 2
1	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno.(há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	teste com amostra de dureza controlada	realizar reunião para solicitar lote selecionado quanto a dureza com a metalsider	Alexandre Estanislau	Weverton Oliveira
2	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno.(há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	teste com amostra de dureza controlada	realizar a produção do lote controlado	Anderson Oracio	
3	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno.(há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	teste com amostra de dureza controlada	acompanhar item em produção durante o teste de usinagem	Anderson Oracio	Felipe Lacerda
4	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno.(há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	desmembrar o processo de usinagem da T571	implementando uma ferramenta as etapas do processo em tratativa	Fidel Montano	
5	Vida útil da ferramenta baixo em relação ao volume de peças produzidos por turno.(há casos de troca da mesma ferramenta até duas vezes por turno).	desmembrar o processo de usinagem da T571	acompanhar melhoria de desmembramento das ferramentas no bruto padrão	Anderson Oracio	Felipe Lacerda
6	Ausência de procedimento de troca de ferramentas no posto de trabalho	disponibilizar ferramenta reserva no posto de trabalho	adquirir os componentes para compor a ferramenta gêmea	Fidel Montano	
7	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	realizar limpeza adequada das ferramentas	fazer o levantamento do aparato adequado para execução da limpeza	Felipe Lacerda	Anderson Oracio
8	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Definição do setor piloto, diagnostico e cronograma de implementação	Walter	SENAI
9	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Treinamento	SENAI	
10	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Implementação no equipamento escolhido (Heller 7 que está com o montante 598)	Walter	Sergio
11	Acúmulo de sujidade nas ferramentas afetam o processo de troca	Desenvolvimento da cultura de Manutenção Autônoma	Acompanhamento dos cartões abertos e acompanhamento dos indicadores	Walter	Sergio

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Figura 30 - Recorte 2 do 5W2H

PESSOA 3	Início	Fim	Onde	Por que	Quanto R\$	Progresso %	ATRASADO	STATUS
	22/11/2022	13/12/2022	HELLER 07	Verificar a dureza se está interferindo no desempenho das ferramentas	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
	03/01/2023	15/03/2023	HELLER 07	Verificar a dureza se está interferindo no desempenho das ferramentas	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
Fidel Montano	15/03/2023	18/04/2023	HELLER 07	Verificar a dureza se está interferindo no desempenho das ferramentas	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
	17/01/2023	14/04/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
	14/04/2023	31/05/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
	31/05/2023	20/06/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
	17/01/2023	31/01/2023	HELLER 07	Reduzir o esforço da ferramenta e também da máquina.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
Sergio	04/10/2023	14/12/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
	07/03/2023	25/04/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
SENAI	25/04/2023	06/06/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	 100%	NÃO	FEITO
SENAI	06/06/2023	27/06/2023	HELLER 07	Desenvolver a prática do TPM e alcançar um maior tempo entre falhas do equipamento.	R\$ -	 75%	NÃO	FAZENDO

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.1.6 Verificações

Para avaliar a eficácia das contramedidas implementadas, realizou-se o acompanhamento hora a hora dos dados produtivos, contemplando indicadores como tempo de ciclo, intervalos médios entre falhas (MTBF) e registros de ocorrência de paradas, como pode ser visto na Figura 31. Também foi realizada uma análise detalhada das paradas específicas do equipamento priorizado, com o objetivo de comparar os resultados obtidos com as medições iniciais, possibilitando mensurar o ganho efetivo em desempenho e disponibilidade. No tablet disponibilizado ao operador, os botões criados para os apontamentos de paradas mais recorrentes elencados com base em todos os apontamentos manuais realizados antes da consultoria. Já no computador, são apresentados os dados compilados destes apontamentos.

Figura 31 - Acompanhamentos das contramedidas apresentadas na empresa A_XXXXX



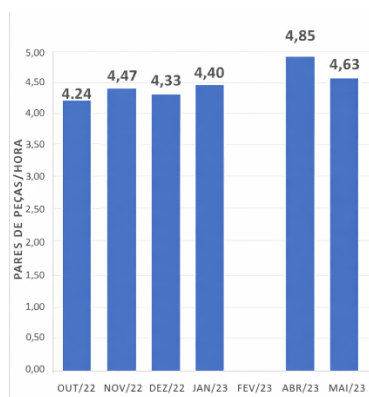
Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.1.7 Acompanhamentos

Como resultado das ações implantadas, constatou-se grande aderência das propostas priorizadas, em especial a decisão de desmembrar o processo envolvendo

a ferramenta crítica e a adoção das práticas de manutenção autônoma no equipamento responsável pela produção do Montante 598 traseiro. Essas medidas proporcionaram melhorias significativas no desempenho operacional, com aumento da disponibilidade e estabilidade do processo produtivo, além de reduzir as paradas não planejadas. A Figura 32 ilustra o aumento na produtividade observados nos dois últimos meses, a Figura 33 ilustra a redução do tempo de ciclo também observados nos dois últimos meses e a Figura 34 ilustra o aumento da disponibilidade, levando em consideração a média dos dois primeiros meses e a média dos dois últimos meses para manter o parâmetro de tempo.

Figura 32 - Pares de peças por hora após contramedidas



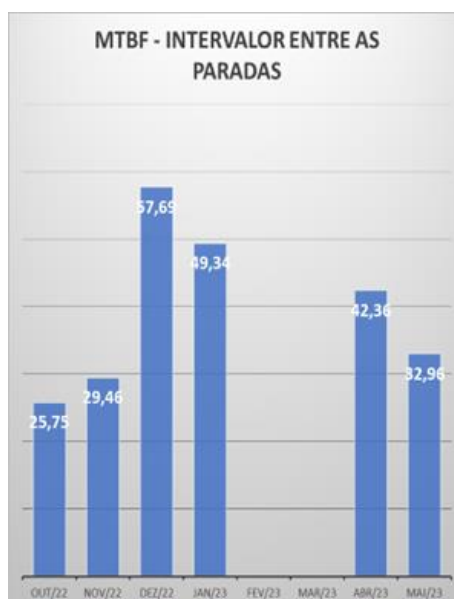
Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Figura 33 - Tempo de ciclo médio por par de peças após contramedidas



Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Figura 34 - MTBF nos meses de análise após contramedidas



Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

O trabalho foi estruturado e conduzido com base na aplicação do Método A3, uma ferramenta Lean usada para resolver problemas de maneira estruturada. Cabe em uma única folha A3 e segue um fluxo lógico: entender o contexto, definir o objetivo, analisar o problema, identificar causas, criar um plano de ação, verificar os resultados e padronizar o que funcionou, garantindo clareza, evitando soluções superficiais e criando uma visão compartilhada entre as equipes. A Figura 35 apresenta o A3 utilizado no estudo. Todo o conteúdo dessa ferramenta encontra-se descrito, analisado e detalhado ao longo do Capítulo 4, garantindo plena legibilidade e compreensão.

Figura 35 - Método A3



Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.2 Medições finais

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nas medições finais após as intervenções.

Tabela 2 - Medições finais da empresa A_XXXXX

Indicador	Quantidade	Unidade
Operadores por turno depois da intervenção	1	Operadores
Horas por turno	7	Horas
Horas de paradas de produção	0,076	Horas
Tempo de operação	6,92	Horas
Produção possível nas horas trabalhadas por turno	64,86	Produção por turno
Produção realizada nas horas trabalhadas por turno	64,16	Produção por turno
Produção não conforme (refugada/retrabalhada)	0	Produção refugada/retrabalhada por turno
Produção boa	64,16	Produção boa por turno
Produtividade (medição final)	9,16	Produção/hh
OEE (medição final)	97,76%	%
Disponibilidade (medição final)	0,9892	Adimensional
Performance (medição final)	0,9883	Adimensional
Qualidade (medição final)	1	Adimensional

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

4.1.3 Resultados da comparação entre a medição inicial e final

Tabela 3 - Resultados comparativos entre medições inicial e final da empresa A_XXXXX

Indicador	Resultado
Produtividade	11,87%
OEE	4,68%
Disponibilidade	0,0236
Performance	0,0227
Qualidade	0
Retorno mensal na empresa após as intervenções	R\$ 18.586,85
Horas realizadas de consultoria em Digitalização	440
Valor da consultoria	R\$ 88.000,00
Retorno do programa (meses)	4,73

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Indicadores apresentados na Tabela 3, expressos como variação relativa (%), sendo que Disponibilidade, Performance e Qualidade são apresentados em forma decimal, enquanto Produtividade e OEE são apresentados em percentual.

4.1.3.1 Análise do Índice de Produtividade

Após a implementação da nova ferramenta T580 e da execução das ações de manutenção corretiva e preventiva no equipamento, observou-se uma redução significativa no tempo de ciclo. O processo, que anteriormente apresentava um ciclo médio de até 850 segundos, resultava em uma produtividade de 57,3 peças por turno, correspondendo a 8,19 peças/hora-homem.

Com as melhorias aplicadas, o ciclo foi reduzido para 777 segundos, possibilitando elevar a produção para 64,1 peças por turno, equivalente a 9,16 peças/hora-homem. Esse avanço representa um aumento de produtividade de 11,87%, sendo considerado um ganho expressivo em termos de eficiência operacional.

4.1.3.2 Análise do Índice de OEE

O indicador de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) refletiu de maneira clara a eficácia das ações implantadas. Inicialmente, o índice se encontrava em 93,39%, resultado impactado pelo elevado tempo de ciclo e pela frequência de paradas não planejadas.

Após a reestruturação do processo, incluindo a redução do tempo de ciclo e o aumento do intervalo médio entre falhas, o OEE evoluiu para 97,76%, representando uma melhoria relativa de 4,68% $((97,76\% - 93,39\%) / 93,39\%)$. Este ganho evidencia o alinhamento positivo entre os pilares de produtividade, eficiência e qualidade da operação.

4.1.3.3 Análise do Índice de Disponibilidade

Por meio do monitoramento em tempo real e da implantação das práticas de manutenção autônoma, foi possível desenvolver uma cultura de priorização do equipamento e mitigar falhas recorrentes. Antes das intervenções, o tempo médio

entre falhas (MTBF) era de 27,61 horas referente a média da coleta de dados dos dois primeiros meses, e a disponibilidade diária situava-se em 6,76 horas em média.

Após as ações, incluindo o desmembramento da usinagem das ferramentas T571 e T580, o MTBF aumentou para 37,66 horas referente a médias da coleta de dados dos dois últimos meses, resultando em uma disponibilidade diária de 6,92 horas. Estes resultados refletem avanços consistentes na confiabilidade operacional do equipamento.

4.1.3.4 Análise do Índice de Performance

A divisão do processo de usinagem da ferramenta T571, redistribuindo parte da operação para a nova ferramenta T580, associada aos ajustes de manutenção realizados, gerou ganhos expressivos no tempo de ciclo. No mês de abril, o ciclo foi reduzido para 743 segundos, enquanto, em maio, consolidou-se em 777 segundos, comparados aos 850 segundos iniciais.

Essa redução corresponde a uma diminuição de 8,59% no tempo de ciclo, permitindo elevar a performance da produção de 57,3 peças por turno para 64,1 peças, reforçando o impacto positivo das ações implementadas.

4.1.3.5 Análise do Índice de Qualidade

No cenário atual, a empresa adota a estratégia de não realizar um controle detalhado das peças não conformes, considerando que o índice de rejeição é extremamente baixo em comparação ao volume total produzido. Essa decisão estratégica baseia-se na priorização de recursos em áreas com maior potencial de impacto na produtividade e eficiência, dado que a qualidade do processo já se encontra em nível satisfatório.

4.1.3.6 Análise do Índice do Retorno do Programa

Antes da execução do programa, o tempo médio de ciclo do Montante 598 traseiros era de 850 segundos (aproximadamente 0,24 horas), com disponibilidade

diária média de 6,76 horas. Com esses parâmetros, a produção diária correspondia a 28,65 pares de peças, ou seja, 57,3 peças por turno.

Ao final das intervenções, o ciclo foi reduzido para 777 segundos (0,215 horas), aliado ao aumento da disponibilidade média para 6,924 horas diárias. Dessa forma, a produção diária passou a ser de aproximadamente 32,08 pares, totalizando 64,16 peças por turno.

O ganho efetivo registrado foi de 6,8 peças adicionais por turno. Considerando uma média de 24 dias trabalhados por mês, o acréscimo mensal correspondeu a 163,2 peças produzidas.

Com base no valor de lucro unitário informado pela empresa (R\$113,89 por peça), o ganho financeiro mensal foi calculado em R\$18.586,85. Diante do investimento total do programa (R\$88.000,00), o payback estimado é de 4,73 meses, comprovando a viabilidade econômica do projeto.

Este resultado comprova a viabilidade econômica da iniciativa, principalmente ao se considerar que os benefícios tendem a se ampliar com a consolidação da nova rotina operacional e a replicação das ações de melhoria em outros processos produtivos.

A Tabela 4 apresenta os principais indicadores de desempenho da empresa A_XXXXX, valores expressos como variação relativa (%), podendo estar em decimal ou percentual, conforme o indicador, antes e depois, conforme os resultados da consultoria em digitalização:

Tabela 4 - Comparação dos indicadores de desempenho antes e depois da consultoria

Indicador	Unidade	Medição Inicial	Meta	Medição Final	Resultado
Produtividade	Produção/hh	8,19	10%	9,16	11,87%
OEE	%	93,39%	-	97,76%	4,68%
Disponibilidade	Adimensional	0,9664	-	0,9892	0,024
Performance	Adimensional	0,9664	-	0,9883	0,023
Qualidade	Adimensional	1,0000	-	1,0000	0,000

Fonte: Elaborado pelo Autor Relatório da Consultoria, 2023

Esses dados demonstram que a aplicação de tecnologias digitais e estratégias de otimização resultou em ganhos substanciais de eficiência, com destaque para o aumento do OEE — métrica que sintetiza a efetividade global do equipamento.

4.2 Análise Qualitativa e Técnica

Além dos ganhos quantitativos, foram observadas melhorias qualitativas relevantes:

- Redução de paradas não planejadas, por meio da implementação de sensores e alarmes de manutenção preditiva.
- Melhoria na estabilidade do processo, com menor variação dimensional nas peças usinadas.
- Aumento da confiabilidade operacional, com maior previsibilidade dos tempos de ciclo.
- Engajamento da equipe operacional, que passou a atuar com base em dados em tempo real.

Esses avanços estão alinhados com os princípios da Indústria 4.0, que preconiza a integração entre sistemas físicos e digitais para tomada de decisão autônoma e inteligente (MARR, 2016).

4.3 Análise Comparativa e Discussão

Com base nos resultados do estudo de caso, observa-se que a empresa apresentou ganhos superiores aos 10% em produtividade e aumento no OEE, o que reforça a eficácia das intervenções. Os resultados satisfatórios do ponto de vista da consultoria podem ser atribuídos ao grau de maturidade tecnológica inicial da empresa, à complexidade dos processos e à aderência das equipes às mudanças propostas.

Embora os ganhos observados sejam consistentes, todo processo produtivo possui variabilidade natural. Os 38 dias de monitoramento, distribuídos ao longo dos meses de consultoria, ajudam a capturar essa variação e reduzir o risco de conclusões baseadas em cenários pontuais. Ainda assim, apenas um acompanhamento de longo prazo permitiria confirmar plenamente que os ganhos são estruturais. Os resultados atuais, especialmente o aumento do MTBF e a redução estável do tempo de ciclo, indicam tendência robusta de melhoria.

Esses resultados corroboram com a literatura técnica. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a otimização de parâmetros de corte e a automação dos

processos são determinantes para o desempenho da usinagem. Já Shingo (1989) destaca que a melhoria contínua é um processo sem fim, e os dados aqui apresentados demonstram que mesmo processos já estabelecidos podem ser significativamente aprimorados com o uso de tecnologias digitais

4.4 Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, recomenda-se:

a) Para a empresa estudada

- Considerar a expansão da digitalização para outras áreas produtivas, como montagem, inspeção e logística interna, visando ampliar os ganhos obtidos.
- Avaliar oportunidades de integração entre sistemas CAD/CAM/DNC/MES para otimizar a fluidez na comunicação entre engenharia e chão de fábrica.
- Ampliar o uso de manutenção preditiva baseada em dados, incorporando sensores adicionais (vibração, temperatura, consumo energético) para complementar o monitoramento já implementado.
- Estabelecer rotinas de análise de dados em tempo real, com dashboards acessíveis aos operadores e gestores.

b) Para outras empresas do setor

- Iniciar o processo de transformação digital por etapas, priorizando áreas com maior impacto no OEE.
- Investir em capacitação técnica contínua, com foco em tecnologias digitais, análise de dados e programação CNC.
- Utilizar simulações CAM e prototipagem virtual como ferramentas padrão para validação de estratégias de usinagem.
- Adotar indicadores de desempenho padronizados, como OEE, para monitoramento contínuo da eficiência operacional.

c) Para futuras pesquisas

- Investigar o impacto da inteligência artificial na otimização de parâmetros de corte em tempo real.
- Avaliar a viabilidade econômica da digitalização em pequenas e médias empresas.
- Estudar a integração entre usinagem CNC e manufatura aditiva (impressão 3D) em ambientes híbridos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal analisar e implementar estratégias de otimização de processos de usinagem CNC com foco no aumento da eficiência produtiva, utilizando como base estudo de caso real em uma empresa metalmeccânica do setor automotivo. A partir da aplicação de metodologias de digitalização industrial, integração de sensores, reprogramação CNC e monitoramento em tempo real, foi possível alcançar resultados em diversos indicadores de desempenho.

A adoção de tecnologias da Indústria 4.0, como sensores IoT e sistemas de monitoramento em tempo real, possibilitou a coleta e análise de dados produtivos, permitindo intervenções assertivas e ganhos comprovados nos indicadores de desempenho.

A análise comparativa entre os dados coletados antes e depois das intervenções evidenciou ganhos, como o aumento de 11,87% na produtividade e a melhoria relativa de 4,68% no OEE, além de avanços em disponibilidade, performance e qualidade. Esses resultados confirmam que a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, contribui para tornar os processos mais eficientes, previsíveis e sustentáveis.

Além dos ganhos quantitativos, observou-se uma transformação qualitativa no ambiente produtivo, com maior engajamento das equipes, redução de falhas operacionais e aumento da confiabilidade dos processos. A integração entre homem, máquina e dados revelou-se essencial para a construção de um sistema produtivo inteligente e adaptável.

A correlação entre as ferramentas digitais aplicadas e os princípios da manufatura enxuta ficou evidente, pois as tecnologias aplicadas contribuíram para reduzir desperdícios, aumentar a disponibilidade e promover a melhoria contínua dos processos, atendendo ao objetivo específico de alinhamento conceitual.

O projeto Rota 2030, executado na empresa A_XXXXX por meio do programa A³ do SENAI, teve como objetivo aplicar conceitos da Indústria 4.0 para aumentar a eficiência produtiva. A intervenção ocorreu na célula de usinagem do Montante 598, envolvendo diagnóstico inicial, instalação do dispositivo WISE-4050, integração com a plataforma MInA e acompanhamento por 38 dias. Essa experiência demonstrou ganhos quantitativos (produtividade +11,87%, OEE +4,68% de variação relativa) e qualitativos (redução de paradas, maior previsibilidade), evidenciando a viabilidade de replicação para outras áreas produtivas. A estruturação das etapas, associada à

capacitação da equipe, reforçou práticas de melhoria contínua alinhadas aos objetivos estratégicos da empresa.

Os ganhos foram alcançados principalmente pela redução do tempo de ciclo, que passou de 850 segundos para 777 segundos, e pela diminuição das paradas não planejadas, fatores que contribuíram para o aumento do MTBF de 27,61 horas para 37,66 horas.

A integração das ferramentas digitais aplicadas — como o dispositivo WISE-4050, a plataforma MInA e os dashboards de monitoramento — aliada aos procedimentos estruturados de melhoria contínua, incluindo Diagrama de Ishikawa, 5 Porquês e método A³, resultou em aumento da produtividade (de 8,18 para 9,16 peças/hora-homem) e melhoria do OEE, que evoluiu de 93,39% para 97,76%. Esses ganhos proporcionaram impacto financeiro positivo para a empresa, com retorno estimado em R\$ 18.586,85 por mês e payback inferior a cinco meses.

A execução das ações complexas reforça o alinhamento da organização aos princípios da manufatura enxuta e da Indústria 4.0, evidenciando a importância da integração entre tecnologia, processos e pessoas para sustentar a melhoria contínua e a competitividade industrial.

Atendimento aos objetivos específicos

Objetivo 1 – Diagnóstico inicial: atendido pela identificação dos principais gargalos, especialmente o desgaste acelerado da ferramenta T571, a ocorrência de paradas não planejadas e o aumento do tempo de ciclo, evidenciados na análise inicial do processo.

Objetivo 2 – Intervenção tecnológica: cumprido com a instalação do WISE-4050, integração com a plataforma MInA e implantação de dashboards, possibilitando coleta contínua e visualização em tempo real.

Objetivo 3 – Análise quantitativa comparativa: atendido pela comparação estruturada entre os indicadores antes e depois das intervenções, demonstrando ganhos consistentes em produtividade, disponibilidade e eficiência operacional.

Objetivo 4 – Alinhamento conceitual: alcançado ao integrar ferramentas Lean (A3, 5 Porquês, 5W2H, Ishikawa) com a digitalização, mostrando coerência entre teoria e prática.

Objetivo 5 – Replicabilidade: parcialmente atendido, pois embora os resultados apresentem potencial de reaplicação, sua generalização depende de requisitos específicos discutidos a seguir.

A replicabilidade das melhorias observadas requer condições mínimas de infraestrutura, automação e cultura organizacional. Do ponto de vista técnico, é necessário que a empresa disponha de máquinas capazes de fornecer sinais digitais ou que permitam retrofit com dispositivos IoT de forma segura. Além disso, processos com certo grau de padronização e repetitividade favorecem o uso de indicadores como OEE e MTBF para análises comparativas. Em termos organizacionais, a replicação demanda disciplina na classificação de eventos, maturidade em práticas Lean e engajamento das equipes de produção e manutenção. Por fim, a confiabilidade depende da estabilidade da rede industrial, da correta instalação dos sensores e da gestão das incertezas de medição. Dessa forma, embora os resultados demonstrem alto potencial de aplicação, sua expansão para outros contextos deve considerar essas condições técnicas e culturais.

Diante dos resultados alcançados, recomenda-se a sustentação das melhorias implementadas e a ampliação das ações para outras famílias de produtos e processos. A continuidade das práticas associadas à manufatura enxuta, como redução de desperdícios, padronização e manutenção autônoma, aliadas ao monitoramento sistemático dos indicadores de desempenho, será essencial para manter a competitividade e garantir ganhos consistentes em produtividade e confiabilidade operacional.

A implementação do programa Rota 2030 em empresas que já possuem cultura consolidada de manufatura enxuta não representa concorrência, mas sim um desafio de integração. É necessário alinhar as práticas existentes aos conceitos da Indústria 4.0, garantindo que as iniciativas digitais complementem os processos enxutos. Essa integração exige planejamento e engajamento das equipes para que as melhorias sejam sustentáveis e ampliem os ganhos de produtividade e eficiência.

Do ponto de vista acadêmico, este estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de engenharia de produção e manufatura digital, ao demonstrar, com base empírica, os impactos positivos da otimização CNC em ambientes industriais reais, reforçando a aplicabilidade prática das tecnologias da Indústria 4.0 e sua replicabilidade em diferentes contextos produtivos.

REFERÊNCIAS

- ADVANTECH. WISE-4050: IoT **Ethernet Remote I/O Module**. 2024. Disponível em: <https://www.advantech.com/products/1-2mlki1/wise-4050>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N. L. **Otimização de processos de usinagem: uma abordagem para sistemas de fabricação flexível que foi implementada em um sistema baseado na web**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2005, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ABCM, 2005.
- BORDIN, F. et al. **Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte**. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266462912_PROCESSOS_DE_USINAGEM_E_RESPONSABILIDADE_AMBIENTAL_ATRAVES_DA_REDUCAO_DA_UTILIZACAO_DE_FLUIDOS_DE_CORTE. Acesso em: 09 jul. 2025.
- CAMARGO, D. Z. de; et al. **Influência dos parâmetros de corte e a geometria da ferramenta sobre potência, formação do cavaco e grau de recalque na usinagem de ligas de alumínio**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA – ENEMEC, 25., 2018, Brasília. Anais [...]. Brasília: ENEMEC, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332120634>. Acesso em: 11 jul. 2025.
- CHEN, B.; WANG, Y. **Smart Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review**. *Engineering*, v. 7, n. 11, p. 1411–1420, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356234567_Smart_Manufacturing_in_the_Context_of_Industry_40_A_Review. Acesso em: 18 jul. 2025.
- CORRER, I. et al. **Proposta para redução de tempo de setup em células de usinagem com o uso de conceitos da metodologia SMED**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329065493_Proposta_para_reducao_de_tempo_de_setup_em_celulas_de_usinagem. Acesso em: 14 jul. 2025.
- COUTO, S. **Como deverão ser as máquinas CNC na indústria 4.0?** 09 set. 2019. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/18705-como-deverao-ser-as-maquinas-cnc-na-industria-40>. Acesso em: 12 dez. 2023.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. ISBN: 9788571931636.

FELIPE, Marcos et al. **Simulação e otimização no processo de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado)**. 9ª Jornada Científica e Tecnológica da Fatec de Botucatu, São Paulo, 2020.

FITZPATRICK, M. **Introdução à usinagem com CNC**. Porto Alegre: AMGH, 2013. ISBN 9788580550453.

GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2014. ISBN: 9788576059298.

INTECH GROUP. **IoT Gateway là gì?** 2025. Disponível em: <https://intech-group.vn/iot-gateway-la-gi-bv991.htm>. Acesso em: 15 jul. 2025

LOPES, E. M.; SILVA, M. A. R. **Manutenção: função estratégica**. São Paulo: Atlas, 2011.

M2M CONTROL. **EX9043 – M2M I/O Module**. 2025. Disponível em: <https://www.m2mcontrol.de/en/product/ex9043/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

MACHADO, Á. R. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. ISBN 9788521209293.

MARR, B. **The 4th Industrial Revolution Is Here – Are You Ready?** 2016. Disponível em: <https://bernardmarr.com/the-4th-industrial-revolution-is-here-are-you-ready/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

MELO, A.; TEN CATEN, C. S.; SANT'ANNA, A. M. O. **Otimização dos parâmetros de usinagem na manufatura do ferro fundido**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274281698_Otimizacao_dos_parametros_de_usinagem_na_manufatura_do_ferro_fundido. Acesso em: 14 jul. 2025.

MILHOSSI, J. F.; QUEIROGA, A. P. G.; RODRIGUES, L. C. **Indústria 4.0 e a transformação digital**. [S. l.]: [s. n.], 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/376591810_Industria_40_e_a_transformacao_digital. Acesso em: 18 jul. 2025.

MINA – MINHA INDÚSTRIA AVANÇADA. **Tela de interface da plataforma MInA.** 2025. Disponível em: <https://portal.mina.com.br/>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MITSUBISHI MATERIALS. **Catálogo de insertos VCGT.** 2024. Disponível em: <https://data.mmc-carbide.com/4716/5821/4785/b098g.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2025.

NASCIMENTO, Michel Henrique da Silva. **Análise de dados coletados por dispositivos de Internet das Coisas aplicada a sistemas embarcados.** 2020. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento Acadêmico de Sistema, Processos e Controles Eletroeletrônicos, Recife, 2020. Orientador: Prof. M.e Anderson Luiz Souza Moreira.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance.** Cambridge: Productivity Press, 1988.

DIEN TU VIET. **Node-RED là gì?** 2025. Disponível em: <https://dientuviet.com/node-red-la-gi/>. Acesso em: 15 jul. 2025

PAMPLONA, E. et al. **Condições econômicas no processo de usinagem: uma abordagem para consideração dos custos.** 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267389377_CONDICAOES_ECONOMICAS_NO_PROCESSO_DE_USINAGEM_UMA_ABORDAGEM_PARA_CONSIDERACAO_DOS_CUSTOS. Acesso em: 14 jul. 2025.

QUEIROZ, M. T. **Automação de Mesa Coordenada Destinada à Máquina Fresadora CNC.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2007.

RÜßMANN, Michael; LORENZ, Markus; GERBERT, Philipp; WALDNER, Manuela; JUSTUS, Jan; ENGEL, Pascal; HARNISCH, Michael. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.** Boston: The Boston Consulting Group, 2015. Disponível em: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries. Acesso em: 14 jul. 2025.

SHINGO, S. **A Study of the Toyota Production System: From an Industrial Engineering Viewpoint.** Productivity Press, 1989.

SILVA, Alexandre Dias da; BEVILACQUA, Julio Cezar. **Implementação de Pós-Processadores em Sistemas CAD/CAM Dedicados.** Universidade Federal de Santa Maria, 2005. Disponível em:
https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/COF_161032277.pdf

SILVA, M. et al. **Finite Element Simulation of Machining Processes: A Review.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 123, p. 1–17, 2018.

SMITH, J. **Otimização na Usinagem: Desafios e Oportunidades.** Editora Acadêmica, 2018.

SMITH, J. **Otimização de Processos na Indústria: Desafios e Oportunidades.** Editora Acadêmica, 2019.