

UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

José Sérgio Medeiros Junior

**CONECTIVIDADE DE MÁQUINAS LEGADAS: IMPLEMENTAÇÃO
DE INTERNET INDUSTRIAL DAS COISAS EM PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

Prof. Dr. Fábio Ferraz Júnior
Orientador

Araraquara, SP – Brasil
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

M439c Medeiros Junior, José Sérgio.

Conectividade de máquinas legadas: implementação de internet industrial das coisas em pequenas e médias empresas/José Sérgio Medeiros Junior. – Araraquara: Universidade de Araraquara, 2025.
124f.

Dissertação (Mestrado) - Mestrado Profissional em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara - UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Ferraz Junior

1. Indústria.4.0 2. Prisma. 3. IIoT. 4. PMEs. 5. Máquinas legadas.
I. Título.

CDU 62-1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JUNIOR, J.S.M. Conectividade de máquinas legadas: implementação de internet industrial das coisas em pequenas e médias empresas. 2025. 124f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade de Araraquara, Araraquara-SP.

ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: José Sérgio Medeiros Junior

TÍTULO DO TRABALHO: Conectividade de máquinas legadas: implementação de internet industrial das coisas em pequenas e médias empresas

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2025

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede a Universidade de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.

J. S. Medeiros Jr.

José Sérgio Medeiros Junior

Universidade de Araraquara – UNIARA

Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801–340, Araraquara-SP

Email (do autor): sergiomedeiros@uol.com.br



UNIVERSIDADE DE ARARAQUARA - UNIARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

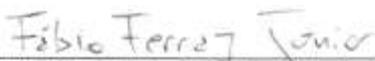
Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade de Araraquara – UNIARA – para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

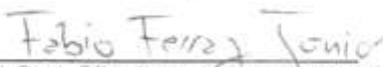
NOME DO AUTOR: JOSÉ SÉRGIO MEDEIROS JUNIOR

TÍTULO DO TRABALHO:

DISSERTAÇÃO INTITULADA "CONECTIVIDADE DE MÁQUINAS LEGADAS: IMPLEMENTAÇÃO DE INTERNET INDUSTRIAL DAS COISAS EM PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS."

Assinatura do(a) Examinador(a)	Conceito
 Prof(a). Dr(a). Fábio Ferraz Junior (orientador(a)) Universidade de Araraquara - UNIARA	(X)Aprovado () Reprovado
 Prof(a). Dr(a). José Luis Garcia Hermosilla Universidade de Araraquara - UNIARA	(X)Aprovado () Reprovado
 Documento assinado digitalmente ERALDO JANNONE DA SILVA Data: 24/03/2025 17:38:06-0300 Verifique em: https://validar.jc.gov.br	(X)Aprovado () Reprovado
Prof(a). Dr(a). Eraldo Jannone da Silva Universidade de São Paulo - USP	

Versão definitiva revisada pelo(a) orientador(a) em: 24/04/25


Prof(a). Dr(a). Fábio Ferraz Junior (orientador(a))

Dedico a minha esposa Ana Paula e ao meu filho Pedro Henrique Medeiros.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus por me orientar no caminho do bem.

Agradeço a equipe da Uniara, representada pela Luciana Paula O. da Silva, pelo pronto atendimento na secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, aos professores, representados pelo coordenador do Programa Prof. Dr. Hermosilla, pela extrema inteligência e competência em cuidar dos alunos e em especial ao Prof. Dr. Fábio Ferraz Júnior pela extrema qualidade, paciência e competência em orientar seus alunos, não poupando esforços para trazer melhorias significativas ao logo do processo desta dissertação e além disso ouvindo e aconselhando nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos colegas de sala que direta ou indiretamente contribuíram para a construção dos saberes adquiridos nesta jornada.

Agradeço aos colegas de trabalho da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe, ao Prof. Msc. André Roberto da Silva e ao Prof. Msc. Paulo José Rodolpho pelo aprendizado nesta pesquisa, compartilhando conhecimento e experiências vividas.

E finalmente, agradeço a Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe, na pessoa de nosso diretor Marcio Vieira Marinho, que incentivou e não mediu esforços para a concretização desta pesquisa.

"Todas as coisas profundas, e as emoções das coisas, são precedidas e acompanhadas pelo Silêncio(...) O Silêncio é a consagração geral do universo." - Herman Melville

RESUMO

A Indústria 4.0 (I4.0) visa modernizar processos industriais por meio de tecnologias digitais, como a Internet das Coisas Industrial (IIoT). No entanto, a integração de máquinas legadas, equipamentos antigos e ainda funcionais, mas sem capacidade nativa de comunicação ou conectividade com redes digitais, é um dos principais desafios para pequenas e médias empresas (PMEs). Este estudo busca identificar os benefícios e barreiras enfrentados pelas PMEs na adoção da I4.0 e propor uma solução viável para a conectividade de máquinas legadas. A pesquisa foi organizada em três etapas: uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), que abrange um cenário internacional mais amplo, seguindo a metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), uma análise de dados secundários coletados de 246 executivos latino-americanos, e o desenvolvimento de uma Prova de Conceito (PoC) aplicando sensores IoT a um torno universal Tormax 30, fabricado em 2007, demonstrando a viabilidade de monitoramento em tempo real. Os resultados revelam que os principais benefícios da adoção da I4.0 incluem maior eficiência e produtividade, redução de custos, melhorias na tomada de decisão e personalização de produtos. Por outro lado, as barreiras identificadas envolvem custos elevados, resistência cultural à mudança, riscos cibernéticos e necessidade de capacitação profissional. A comparação entre a literatura e os dados secundários destaca uma maior resistência à mudança e maior preocupação com custos nas PMEs latino-americanas, além de limitações financeiras mais significativas em relação ao cenário internacional. A PoC demonstrou que a integração de sensores IoT em máquinas legadas é tecnicamente viável. Adicionalmente, foram apresentadas recomendações específicas para a implementação de IIoT em PMEs, facilitando a adoção da I4.0. Sugere-se a expansão do modelo para interconectar múltiplos equipamentos, aproximando-se de um ambiente fabril real e potencializando a transformação digital nas PMEs.

Palavras-chave: Indústria 4.0. PRISMA. IIoT. PMEs. Máquinas Legadas.

ABSTRACT

Industry 4.0 (I4.0) aims to modernize industrial processes through digital technologies such as the Industrial Internet of Things (IIoT). However, the integration of legacy machines, older but still functional equipment without native communication capabilities or digital network connectivity, is one of the main challenges for small and medium-sized enterprises (SMEs). This study seeks to identify the benefits and barriers faced by SMEs in adopting I4.0 and to propose a viable solution for connecting legacy machines. The research was organized into three stages: a Systematic Literature Review (SLR), which covers a broader international context using the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) methodology, an analysis of secondary data collected from 246 Latin American executives, and the development of a Proof of Concept (PoC) applying IoT sensors to a Tormax 30 universal lathe, manufactured in 2007, demonstrating the feasibility of real-time monitoring. The results reveal that the key benefits of adopting I4.0 include increased efficiency and productivity, cost reduction, improved decision-making, and product customization. On the other hand, the identified barriers involve excessive costs, cultural resistance to change, cybersecurity risks, and the need for workforce training. The comparison between the literature and secondary data highlights greater resistance to change and higher cost concerns among Latin American SMEs, as well as more significant financial constraints compared to the international context. The PoC demonstrated that integrating IoT sensors into legacy machines is technically feasible. Additionally, specific recommendations for IIoT implementation in SMEs were provided, facilitating the adoption of I4.0. It is suggested that the model be expanded to interconnect multiple pieces of equipment, bringing it closer to a real factory environment and enhancing digital transformation in SMEs.

Keywords: *Industry 4.0. PRISMA. IIoT. SMEs. Legacy Machine*

Lista de figuras

Figura 1 – A casa da Indústria 4.0	23
Figura 2 – Fluxograma da metodologia.....	38
Figura 3 – Metodologia PRISMA 2020	39
Figura 4 – Etapas do PoC Design.....	43
Figura 5 – Arquitetura baseada em SOA para sistemas IoT.....	44
Figura 6 – Relação entre tipos de documentos e ano de publicação	46
Figura 7 – Evolução das publicações por tipo de documento de 2013 a 2023.....	47
Figura 8 – Coocorrência de palavras-chave	48
Figura 9 – Palavras-chave mais citadas	49
Figura 10 – Mapa de cocitações	50
Figura 11 – Resultados PRISMA 2020	52
Figura 13 – Diagrama em blocos da topologia.....	79
Figura 14 – Sensor de corrente SCT-013	80
Figura 15 – Sensor de umidade e temperatura DTH11	80
Figura 16 – <i>Gateway</i> implementado via Node-RED.....	82
Figura 17 – <i>Dashboard</i> da aplicação.....	84
Figura 18 – OEE <i>dashboard</i>	93

Lista de Quadros

Quadro 1 – Síntese dos benefícios e barreiras da adoção da I4.0 por PMEs.....	52
Quadro 2 – Benefícios da adoção da I4.0 por PMEs.....	58
Quadro 3 – Barreiras da adoção da I4.0 por PMEs	60
Quadro 4 – Comparativo entre RSL versus Dados Secundários	73
Quadro 5 – Recomendações para implementação de IIoT em PMEs	90
Quadro 6 – Parâmetros Monitorados e Soluções IIoT	95
Quadro D.1 – Recomendações para implementação de IIoT em PMEs	121

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Documentos encontrados na Plataforma Scopus	45
Tabela 2 – Tipo de documentos versus quantidade	46
Tabela 3 – Dados coletados da PoC	87

Lista de Abreviaturas e Siglas

CLP – Controlador Lógico Programável

CEO – *Chief Executive Office* ou Diretor Executivo

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CPS – *Cyber-Physical Systems* ou Sistemas Ciber Físicos

CSV – *Comma-Separated Values*

I4.0 – Indústria 4.0

IA – Inteligência Artificial

IoT – *Internet of Things* ou Internet das Coisas

IIoT – *Industrial Internet of Things* ou Internet Industrial das Coisas

LM – *Lean Manufacturing*

M2M – *Machine to Machine* ou Máquina a Máquina

MQTT – *Message Queuing Telemetry Transport*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness* ou Eficiência Global do Equipamento

PCI – Placa de Circuito Impresso

PMEs – Pequenas e Médias Empresas

PoC – *Proof of concept* ou Prova de Conceito

PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses*

RA – Realidade Aumentada

RFID – *Radio Frequency Identification*

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SMEs – *Small and Medium-sized Enterprises*

SOA – *Service-Oriented Architecture*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização e problemática.....	14
1.2 Questão da Pesquisa	17
1.3 Objetivo Geral	17
1.3.1 Objetivos Específicos	17
1.4 Justificativa da pesquisa	18
1.5 Aspectos metodológicos	19
1.6 Estrutura	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Contexto da Indústria 4.0	22
2.1.1 Internet Industrial das Coisas	24
2.2 Gestão da Produção	26
2.2.1 Maior Eficiência e Produtividade	28
2.2.2 Maior Flexibilidade e Agilidade.....	29
2.2.3 Melhor Controle de Qualidade	30
2.3 <i>Lean Manufacturing</i> e a Indústria 4.0	31
2.3.1 <i>Lean</i> 4.0.....	34
2.4 Implementação de Conectividade em Máquinas Legadas.....	35
3 METODOLOGIA	38
3.1 Revisão Sistemática da Literatura	39
3.2. Dados Secundários	40
3.3 Análise e Proposição	42
4 RESULTADOS.....	45
4.1 Revisão Sistemática da Literatura	45
4.1.1 Método PRISMA.....	50
4.2 Análise dos Dados Secundários.....	61
4.2.1 Perfil Econômico das Empresas Respondentes	62
4.2.2 Perfis dos Executivos Envolvidos nas Iniciativas de IoT.....	63
4.2.3 Análise da Distribuição por Segmentos de Atuação	64
4.2.4 Evolução e Nível de Adoção de IoT.....	65
4.2.5 Expectativa e Realidade sobre a Importância da IoT	66
4.2.6 Desafios para Adoção de IoT nas Empresas Latino-Americanas.....	67
4.2.7 Capacitação de Profissionais em Tecnologias Relacionadas à IoT	68
4.2.8 Análise do Investimento em IoT	69
4.2.9 Adoção de Plataformas de IoT	70

4.2.10 Abordagens de Segurança para IoT	72
4.3 Comparação entre as fontes de pesquisa	73
4.4 Prova de conceito.....	75
4.4.1 Concepção	76
4.4.2 Construir	85
4.4.3 Avaliar	86
4.4.4 Aprender	87
4.5 Premissas e Delimitações do Projeto.....	89
4.6 Aplicação futura	93
5 CONCLUSÃO	99
5.1 Limitações do estudo	102
5.2 Recomendações para futuros trabalhos	102
REFERÊNCIAS	104
APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO.....	115
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO <i>FIRMWARE</i>	118
APÊNDICE C – <i>LAYOUT</i> DA PCI	120
APÊNDICE D – COMPARATIVO DA INFRAESTUTURA IOT	121

1 INTRODUÇÃO

A presente seção destina-se a apresentação do contexto e do problema da pesquisa, bem como a questão da pesquisa, do objetivo, da justificativa, dos aspectos metodológicos e da estrutura da pesquisa.

1.1 Contextualização e problemática

As pequenas e médias empresas (PMEs) desempenham um papel relevante na economia da União Europeia (UE), abarcando mais de 90% de todas as empresas. Em números concretos, em 2023, a UE contava com 24,3 milhões de PMEs. Diante disso, a promoção de estudos e iniciativas nessa área é fundamental para acelerar o processo de transformação digital dessas empresas (BURINSKIENĚ; NALIVAIKĚ, 2024).

Já no Brasil, este número é similar. Segundo o Portal da Indústria, em 2024, com base em dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) - Ministério da Economia, as PMEs da indústria da transformação, que envolve a transformação física, química e biológica de materiais, substâncias e componentes com a finalidade de se obterem produtos novos, representam 98,6% do total e a participação da indústria da transformação no Produto Interno Bruto (PIB) é de 15,3% (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2024).

Apesar disso, a maioria das PMEs ainda opera com máquinas legadas e obsoletas, sem a capacidade de troca dados entre máquinas e sistemas (KOLLA et al., 2022; FAN; CHANG, 2018; DESHPANDE, 2011). De acordo com Fan e Chang (2018), máquinas utilizadas na manufatura com vida útil média de 20 anos são chamadas de equipamentos legados e são incompatíveis com a conexão de redes. Na visão de Deshpande (2011), uma máquina legada é definida como um equipamento de fabricação sem capacidade de comunicação externa e/ou uma interface de programação de aplicativo que possa fornecer dados em tempo real. Portanto, legado, na perspectiva do autor, define a capacidade do dispositivo em se comunicar, e não a idade do equipamento.

Esse cenário apresenta um desafio significativo, o fato de que as PMEs não estarem adequadas para obter os benefícios do uso das tecnologias habilitadoras da I4.0, como por exemplo, a Internet das Coisas Industrial (IIoT), que pode trazer o benefício do monitoramento em tempo real, entre outros benefícios (KOLLA et al., 2022).

Em 2011, uma iniciativa do governo alemão, chamada de quarta revolução industrial ou Indústria 4.0 (I4.0), ganhou destaque ao ser apoiada por representantes dos setores empresarial, político e acadêmico como uma abordagem para fortalecer a competitividade da indústria de

manufatura alemã. A ideia por trás da I4.0 é promover melhorias significativas nos processos industriais, incluindo fabricação, engenharia, gerenciamento de materiais, cadeia de suprimentos e ciclo de vida dos produtos (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

De acordo com Kagermann et al. (2013), a I4.0 trará maior flexibilidade e robustez juntamente com os mais altos padrões de qualidade em processos de engenharia, planejamento, fabricação, operação e logística. Isso levará ao surgimento de cadeias de valor dinâmicas, otimizadas em tempo real e que podem ser otimizadas com base em uma variedade de critérios, como custo, disponibilidade e consumo de recursos.

A I4.0 se fundamenta na incorporação de tecnologias da internet na manufatura. Embora a maioria dos componentes técnicos esteja disponível, eles são principalmente usados em outros setores, como o consumo. A infraestrutura de comunicação nos sistemas de produção se tornará cada vez mais acessível e difundida, resultando em uma nova forma de indústria onde componentes e produtos industriais podem ter suas próprias identidades. Isso possibilita maior autonomia dos sistemas e acesso à fábrica digital e à simulação virtual (DRATH; HORCH, 2014).

Conforme Kagermann et al. (2013), a I4.0, trará consigo novos modelos de negócios, que possibilitarão a pequenas e médias empresas (PMEs) utilizem serviços e sistemas de software que antes eram inacessíveis devido aos modelos atuais de licenciamento e negócios. Os novos modelos de negócios apresentarão soluções para desafios como preços dinâmicos que consideram as circunstâncias dos clientes e dos concorrentes.

De acordo com a Sondagem Especial, de 2022, realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), o porte da empresa desempenha um papel na determinação do grau de adoção de tecnologias digitais. À medida que o tamanho da empresa aumenta, a utilização de pelo menos uma tecnologia digital também aumenta. Entre as grandes empresas, 86% estão empregando pelo menos uma das 18 tecnologias mencionadas nessa sondagem. Esse número cai para 64% nas empresas de médio porte e para 42% nas pequenas empresas (CNI, 2022).

A falta de preparo dos sistemas e componentes legados para a conectividade e interoperabilidade exigidas na I4.0 é um problema significativo. Para Huang et al. (2022), muitos esforços estão sendo feitos para reconfigurar os ambientes de produção atuais, entretanto, o chão de fábrica, que é um elemento fundamental na produção, muitas vezes contém máquinas legadas que são confiáveis, mas não estão configuradas para se comunicar.

Devido à sua confiabilidade mecânica e altos custos de substituição, muitas PMEs ainda utilizam uma grande quantidade de máquinas antigas sem conexão em rede, como essas máquinas não possuem recursos nativos de comunicação externa, elas ficam isoladas em um

ambiente industrial em rede, o que torna o monitoramento e controle de todo o processo produtivo incompleto. Portanto, a adaptação dessas máquinas para se comunicar é o primeiro passo para a integração em um sistema de produção em rede que permite a coleta de dados valiosos para análise e exploração, a fim de alcançar uma produção mais eficiente (HUANG et al., 2022).

De acordo com Kolla et al. (2022), é comum que as fábricas sejam construídas gradualmente, com adições e atualizações ao longo do tempo. Por conta disso, é possível que as empresas tenham equipamentos de diferentes fabricantes, idades e interfaces dentro da mesma fábrica, incluindo máquinas, sensores e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Essa situação é agravada pelo fato de que os fabricantes possuem softwares proprietários e interfaces específicas, o que dificulta a unificação dos dados e informações coletados por esses dispositivos.

A IIoT é uma das tecnologias mais promissoras para a indústria atual. Ela permite a integração de várias tecnologias modernas, como sistemas ciber físicos (CPS), computação em nuvem, tecnologias móveis e identificação por radiofrequência (RFID) e a coleta de dados por sensores em ambientes industriais. Isso é possível graças ao uso de *big data* e tecnologias de comunicação máquina a máquina (M2M) e automação (NGUYEN et al., 2019)

Segundo Nguyen et al. (2019), a IIoT depende fortemente da Internet das Coisas (IoT), uma rede de dispositivos físicos equipados com sensores, atuadores, eletrônicos, software e conectividade de rede que permite a troca de dados entre esses objetos. A IoT atua como uma interface entre o mundo físico e o mundo digital, permitindo que dispositivos e máquinas em ambientes industriais se conectem e transmitam informações em tempo real, permitindo maior eficiência, precisão e automação.

Para efetivar uma plataforma I4.0, um dos elementos chave consiste em dotar as máquinas com capacidades de detecção e comunicação. Contudo, na esfera fabril, a maioria das máquinas legadas foi equipada antes do advento da produção da I4.0. Por conseguinte, a inserção de habilidades adicionais de detecção e comunicação nessas máquinas suscitou grande interesse em aplicações práticas (HO; LAI; LIU, 2022).

A implementação de uma Prova de Conceito (PoC) para aplicação de IoT em máquinas legadas é fundamental para validar a viabilidade e os benefícios dessas tecnologias em ambientes industriais. Alguns estudos têm explorado a viabilidade de PoCs em PMEs, demonstrando que é possível integrar sensores e dispositivos IoT a máquinas legadas para obter dados em tempo real sobre desempenho e consumo de energia. Por exemplo, Lima, Massote e Maia (2019) conduziram uma PoC em uma fresadora CNC da LabVolt com 20 anos, onde

incorporaram sensores e sistemas baseados em IoT, juntamente com o uso de aplicativos em nuvem, para monitorar os dados de energia em tempo real. Já a pesquisa de Fan e Chang (2018), descreve o desenvolvimento de IoT baseada no Raspberry PI, que incorpora um aplicativo para detectar o estado operacional de máquinas legadas. Utilizando sensores externos, ela monitora o status das máquinas para calcular a disponibilidade (um dos fatores do OEE – *Overall Equipment Effectiveness*) e mede a corrente elétrica para determinar o consumo de energia. E por fim, Deshpande (2011), desenvolveu de um aplicativo de software para monitorar o status da máquina em tempo real, o uso de energia e outros parâmetros de usinagem para uma máquina-ferramenta legada, utilizando a análise do sinal de potência.

1.2 Questão da Pesquisa

Diante da falta de integração de máquinas legadas à I4.0, esta dissertação propõe responder as seguintes questões de pesquisa: Quais são os benefícios e barreiras enfrentados pelas PMEs na adoção da I4.0, considerando a conectividade de máquinas legadas? Quais recomendações podem apoiar a implementação de soluções IIoT em PMEs, considerando a integração de máquinas legadas?

1.3 Objetivo Geral

Em vista disso, o objetivo geral desta dissertação é identificar de modo exploratório os principais benefícios e barreiras enfrentados pelas PMEs na jornada de transformação digital, visando capacitá-las a adotar com sucesso as tecnologias da I4.0, e em seguida, propor a implementação de uma PoC de uma plataforma IoT adaptada para PMEs, demonstrando a viabilidade técnica da integração de máquinas legadas ao ambiente da I4.0.

1.3.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral esta pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para identificar os principais benefícios e barreiras enfrentados pelas PMEs, no exterior, na adoção da I4.0, com foco na gestão da produção;
- b) Realizar uma análise de dados secundários para identificar os principais benefícios e barreiras enfrentados pelas empresas em um contexto latino-americano, refletindo de forma aproximada a realidade do cenário nacional;
- c) Analisar os resultados da RSL e dos dados secundários para identificar padrões, tendências e percepções relevantes acerca da adoção da I4.0 pelas PMEs. Essas

informações são essenciais para propor uma PoC adequada que utilize tecnologias de IoT, especificamente para a conectividade de máquinas legadas;

- d) Desenvolver e implementar uma PoC que demonstre a viabilidade técnica de promover a conectividade de máquinas legadas à I4.0 por meio de tecnologias de IoT;
- e) Propor recomendações para implementação de IIoT, com base nos benefícios e barreiras identificadas, para auxiliar as PMEs na adoção da I4.0, a fim de fornecer orientações para futuras melhorias e aplicações em contextos industriais reais.

1.4 Justificativa da pesquisa

Para que as PMEs prosperem no futuro, há uma forte sugestão de que adotem a I4.0 para competirem a nível nacional e internacional (MASOOD; SONNTAG, 2020).

Segundo um estudo da CNI (2022), dentre as empresas industriais brasileiras, 69% já estão empregando pelo menos uma tecnologia digital de uma lista que inclui 18 aplicações distintas com foco em desenvolvimento, processo de produção e produto. Em 2016, quando esse estudo foi conduzido pela primeira vez, apenas 48% das empresas estavam utilizando alguma tecnologia digital de uma lista com 10 tecnologias previamente selecionadas.

A I4.0 tem o potencial de transformar a indústria, por meio da utilização de tecnologias existentes ou combinando-as de maneiras novas e inovadoras, a fim de atender às diversas demandas de produção de maneira mais eficiente e rentável. É importante destacar que essa abordagem pode oferecer monitoramento contínuo e medição de desempenho para reduzir o desperdício, além de fornecer maior controle do processo e uso mais eficiente da mão de obra (HUANG et al., 2022).

Conforme Kadir (2020), a IoT é um sistema em rede que conecta objetos à internet e estes fazem parte do nosso cotidiano, sendo considerada uma tecnologia fundamental para solucionar vários desafios. Segundo o mesmo autor, a IIoT é uma subdivisão da IoT que tem como foco a aplicação dessas tecnologias em ambientes industriais, tornando-se peça essencial para o conceito de I4.0, permitindo que as empresas colem informações constantes de máquinas, sensores, produtos e dispositivos para detectar falhas, monitorar qualidade e realizar manutenções.

Conforme Xu et al. (2018), diferente da IoT, que tem como foco os sistemas voltados para os consumidores, a IIoT concentra-se na conectividade dos dispositivos industriais inteligentes com plataformas de gerenciamento e controle, com o objetivo de melhorar a eficiência operacional e aumentar a produtividade dos sistemas industriais. Como os

dispositivos e processos industriais são autônomos, a IIoT é considerada uma aplicação importante da IoT.

Alabadi, Habbal e Wei (2022) relatam que a IIoT é uma evolução tecnológica que melhora o setor manufatureiro, permitindo a coleta e processamento de dados em várias etapas do processo de fabricação. A IIoT se concentra em melhorar a acessibilidade, desempenho, escalabilidade, economia de tempo e de custos nas empresas de manufatura, sendo frequentemente associada à I4.0. Enquanto o ambiente de produção tradicional depende da interação local entre os componentes do sistema, a IIoT permite comunicação global entre componentes em diferentes locais.

De acordo com CNI (2023), os maquinários e equipamentos utilizados na indústria brasileira têm uma média de idade de 14 anos e 38% das máquinas e equipamentos nas empresas industriais estão próximos ou já ultrapassaram o período recomendado pelo fabricante como ciclo de vida ideal.

Segundo CNI (2023), a idade dos equipamentos também influencia a capacidade das empresas de adotar novas tecnologias, como as da I4.0. Embora seja viável modernizar máquinas e equipamentos mais antigos para incorporar tecnologias digitais (por meio de *retrofit*), à medida que esses equipamentos envelhecem, o processo se torna mais complexo e dispendioso devido a incompatibilidades com sistemas operacionais mais recentes, entre outros desafios.

De acordo com os autores Jiwangkura, Sophatsathit e Chandrachai (2020), as PMEs, devido aos seus recursos limitados, podem ficar para trás na era da disrupção digital e a pesquisa acadêmica sobre estratégias de implementação de IIoT para PMEs é limitada.

1.5 Aspectos metodológicos

Segundo Gil (2017), classificar é uma característica da racionalidade humana, permitindo a organização e entendimento dos fatos. Com um sistema de classificação, é possível reconhecer as semelhanças e diferenças entre as modalidades de pesquisa, ajudando o pesquisador a decidir sobre sua aplicabilidade na solução dos problemas de investigação.

Para Turrioni e Melo (2012), em relação a sua natureza, uma pesquisa aplicada tem como objetivo resolver problemas práticos imediatamente por meio de seus resultados, pois busca gerar conhecimento para aplicação direta na solução de problemas específicos, assim sendo, essa dissertação é classificada como uma pesquisa aplicada, diferentemente da pesquisa básica, que visa ampliar o entendimento teórico de um assunto sem foco imediato na aplicação prática.

Quanto ao seu objetivo, é classificada como pesquisa exploratória para nos familiarizarmos com o problema e construir hipóteses. É um tipo de pesquisa flexível que considera vários aspectos do fenômeno estudado, e a coleta de dados pode ser feita de várias maneiras, como levantamento bibliográfico, entrevistas e análise de exemplos (GIL, 2017). Para a realização do levantamento bibliográfico, foram reunidas e avaliadas publicações acadêmicas, através da plataforma Scopus.

Para complementar o levantamento bibliográfico, uma análise de dados secundários foi realizada com a finalidade de ampliar e aprofundar o entendimento da mesma temática, utilizando informações já disponíveis em fontes publicadas. A análise secundária de dados qualitativos, embora menos comum que a análise quantitativa, apresenta vantagens significativas, incluindo economia de tempo e acesso a dados ricos, o que a torna uma metodologia cada vez mais relevante na pesquisa em diversas áreas (RUGGIANO; PERRY, 2019). Com a crescente disponibilidade de dados qualitativos online de alta qualidade, a análise secundária se torna uma alternativa atraente para pesquisadores que buscam aprofundar o conhecimento sobre diversos temas (CHATFIELD, 2020). De acordo com Chatfield (2020), essa abordagem permite o acesso a informações de participantes de difícil alcance, a otimização de recursos e a geração de novas descobertas a partir da exploração de dados existentes sob novas perspectivas.

Conforme Creswell (2012), o intuito de uma pesquisa qualitativa não é o de generalizar os resultados para uma população, mas sim de desenvolver um entendimento mais profundo sobre um fenômeno. A presente dissertação utiliza a análise secundária de dados qualitativos para explorar os benefícios e as barreiras da adoção da I4.0 no contexto latino-americano, a partir de um conjunto de dados, extraídos do relatório IoT Snapshot 2024 (LOGICALIS, 2024), organizado pela empresa Logicalis, onde foram entrevistados 246 executivos de diferentes países da América Latina, incluindo Brasil, Argentina, Chile, Colômbia e México, entre setembro e novembro de 2023.

A metodologia proposta prioriza inicialmente a investigação exploratória junto às PMEs para mapear as limitações e potencialidades da adoção da IIoT, estabelecendo assim as bases para a formulação de uma solução alinhada às demandas reais do setor. Após a síntese e interpretação dos dados coletados, foi desenvolvido e implementado um protótipo, conforme as etapas da metodologia Poc Design proposta por Prasanna et al. (2021). A PoC serve ao propósito de garantir a integridade da IoT no contexto específico de entrega de dados confiáveis. Isso envolve verificar o desempenho de uma solução proposta dentro do ambiente

pretendido, bem como coletar dados pertinentes e conduzir uma análise completa dos resultados (PRASANNA et al., 2021).

1.6 Estrutura

A dissertação está dividida em cinco seções principais, além das referências bibliográficas.

A primeira seção, Introdução, apresenta uma visão geral do tema, destacando a importância das PMEs na economia, o contexto da I4.0, e os desafios enfrentados na integração de máquinas legadas. Também são definidos a questão da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa do estudo, os aspectos metodológicos e a estrutura da dissertação.

Na segunda seção, Revisão Bibliográfica, é apresentada uma análise detalhada da literatura existente sobre a I4.0, incluindo suas definições, aplicações e impacto nas PMEs. A seção aborda também a gestão da produção no contexto da I4.0, explorando como essa revolução industrial pode ser integrada nas operações das PMEs para melhorar eficiência e competitividade.

A terceira seção, Metodologia, descreve os aspectos metodológicos utilizados na pesquisa, incluindo a metodologia aplicada na revisão bibliográfica, a análise de dados secundários por meio de um relatório e a metodologia para desenvolvimento da PoC.

Na quarta seção, Resultados, os achados da pesquisa são apresentados e discutidos nesta seção. Inclui os benefícios e barreiras na adoção da I4.0 pelas PMEs, tanto na revisão bibliográfica quanto nos dados secundários, uma comparação entre as fontes de pesquisa, além da criação de um quadro de recomendações para implementação de IIoT. Também é apresentada uma proposta para a conectividade de máquinas legadas à I4.0 por meio de tecnologias de IoT. Por fim, são apresentados os resultados da implementação da PoC, evidenciando sua viabilidade técnica.

A quinta seção, Conclusão, resume os principais resultados e contribuições da pesquisa encontrados na seção quatro e aponta possíveis diretrizes para a evolução do tema e suas limitações.

Por fim, a lista de referências bibliográficas mostra todas as fontes citadas ao longo da dissertação, oferecendo uma base sólida para o leitor que deseja aprofundar seus conhecimentos sobre os temas abordados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta o contexto da I4.0 e suas definições, bem como um olhar da gestão da produção sobre a perspectiva da I4.0.

2.1 Contexto da Indústria 4.0

O termo I4.0 originou-se em 2011 na Feira de Hannover, na Alemanha, como parte de uma estratégia do governo alemão de promover a digitalização do setor manufatureiro do país (SANTOS et al., 2017). O conceito se refere à quarta revolução industrial, focada na integração de tecnologias digitais aos processos de manufatura.

A I4.0 é caracterizada como uma nova revolução industrial centrada em torno de CPS, representando a integração de sistemas físicos e digitais em tempo real, com o uso de tecnologias emergentes como manufatura aditiva, IoT, *blockchain*, robótica avançada e inteligência artificial (IA), para alterar a forma como o trabalho é realizado e gerenciado (RUPP et al., 2021).

Para Shi et al. (2020), a I4.0 é entendida como um nível mais recente de controle e organização sobre a cadeia de valor do ciclo de vida do produto, focado em requisitos individuais de clientes, e baseia-se na disponibilidade de informações relevantes em tempo real, conectando todas as atividades da cadeia de valor para formar conexões de valor agregado dinâmicas, auto-organizáveis e otimizadas em tempo real.

As revoluções industriais marcaram transformações profundas nos meios de produção ao longo dos séculos. A primeira dessas revoluções, ocorrida no final do século XVIII, introduziu equipamentos mecânicos de fabricação, como os teares mecânicos. Em seguida, a segunda revolução industrial caracterizou-se pela adoção da produção em massa impulsionada pela eletricidade e pela implementação da divisão do trabalho. Posteriormente, a terceira revolução utilizou a eletrônica e as tecnologias de informação para automatizar ainda mais os processos de fabricação, envolvendo o uso de tecnologias como os controladores lógicos programáveis (CLP) (KAGERMANN et al., 2013).

Para o Parlamento Europeu, de acordo com Smit et al. (2016) a I4.0 é definida como:

A Indústria 4.0 descreve a organização de processos de produção baseados em tecnologia e dispositivos que se comunicam autonomamente ao longo da cadeia de valor: um modelo da 'fábrica inteligente' do futuro em que sistemas dirigidos por computador monitoram processos físicos, criam uma cópia virtual do mundo físico e tomam decisões descentralizadas com base em mecanismos de auto-organização. O conceito leva em conta a digitalização crescente das indústrias de manufatura, onde objetos físicos são integrados de maneira contínua à rede de informações, permitindo produção descentralizada e adaptação em tempo real no futuro (SMIT et al., 2016, p.7).

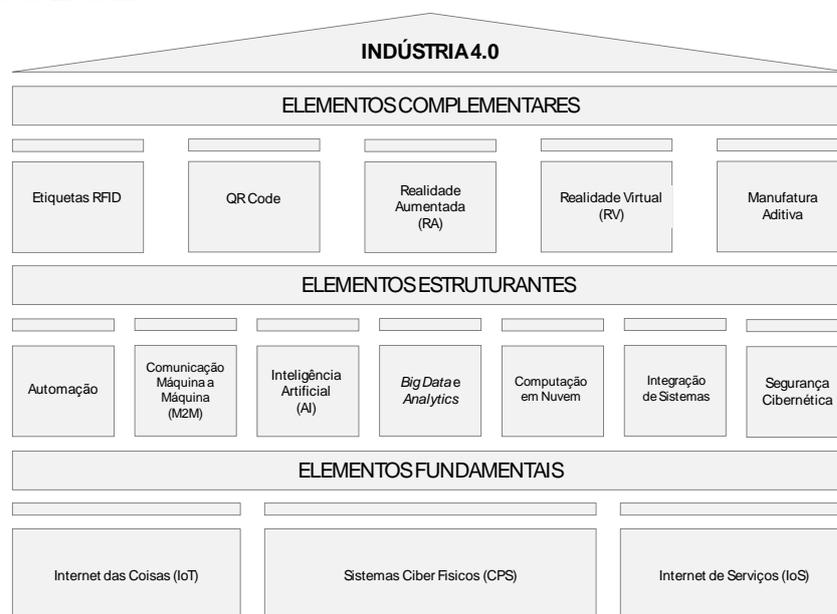
A I4.0 envolve a integração horizontal e vertical de sistemas, promovendo a conexão digital entre diferentes áreas da empresa, com seus fornecedores e clientes. Dados são coletados em tempo real de máquinas, sistemas e produtos inteligentes e compartilhados para análise e coordenação automatizada de processos físicos (HERMANN et al., 2016).

Segundo Zhong et al. (2017), os sistemas de manufatura inteligentes se tornam mais adaptáveis, inteligentes e personalizáveis ao mercado global em constante mudança devido ao uso de informações avançadas.

Shafiq et al. (2016) afirmam que os principais objetivos da I4.0 incluem possibilitar a customização em massa de produtos por meio da tecnologia da informação, adaptar automaticamente as cadeias de produção, rastrear peças e produtos, melhorar a comunicação entre peças, produtos e máquinas, implementar interações entre humanos e máquinas, otimizar a produção por meio da IoT em fábricas inteligentes e introduzir novos serviços e modelos de negócios na cadeia de valor.

Segundo Sacomano et al. (2018), os elementos constituintes da I4.0, conforme Figura 1, estão em constante evolução, propondo uma categorização em três partes distintas: elementos fundamentais, estruturantes e complementares.

Figura 1 – A casa da Indústria 4.0



Fonte: Adaptada de SACOMANO et al. (2018).

Os elementos apresentados na Figura 1 podem ser explicados como:

- Elementos Fundamentais: correspondem à infraestrutura tecnológica essencial no conceito da I4.0, são elas: Internet das Coisas (IoT), sistemas Ciber Físicos (CPS) e Internet de Serviços (IoS);
- Elementos Estruturantes: englobam tecnologias e/ou conceitos que viabilizam a implementação de aplicações da I4.0, entre eles: Automação, comunicação Máquina a Máquina (M2M), Inteligência Artificial (IA), *Big Data e Analytics*, Computação em Nuvem, Integração de Sistemas e Segurança Cibernética;
- Elementos Complementares: estendem as possibilidades da I4.0, ainda que sua presença não seja obrigatória para caracterizar algo como pertencente a essa vertente industrial, podemos destacar: etiquetas RFID, QR Code, Realidade Aumentada (RA), Realidade Virtual (RV) e Manufatura Aditiva.

2.1.1 Internet Industrial das Coisas

O avanço das tecnologias sem fio ao longo das últimas décadas deu origem a um novo modelo conhecido como IoT. Esta abordagem, inicialmente proposta por Kevin Ashton em 1998, visa conectar objetos à internet. Embora amplamente reconhecida por seus benefícios em diversos setores, como residências inteligentes, saúde, transporte e meio ambiente, a IoT também promete transformar a indústria, possibilitando um monitoramento e controle mais eficientes e econômicos. Prevê-se que essas inovações e benefícios industriais sejam ampliados sob o conceito emergente de IIoT (KHAN et al., 2020).

Os avanços nas pesquisas recente abriram caminho para a implementação dos princípios da IoT em diversos contextos industriais, impulsionando o surgimento da IoT Industrial (IIoT), visando transformar a gestão e os processos empresariais, aumentando a eficiência das tecnologias de fabricação por meio da coleta e análise de dados em campo, resultando na criação de representações digitais em tempo real dos ambientes industriais (BELLI et al., 2019).

Khan et al. (2020) descreve a IIoT como a integração de dispositivos industriais inteligentes e altamente interconectados, utilizados para aumentar a eficiência de produção e reduzir os custos operacionais. Isso é alcançado por meio do monitoramento em tempo real, da gestão eficaz e do controle dos processos industriais, dos ativos e do tempo de operação.

A IoT tem sido um tópico popular há quase uma década, permitindo que milhões de dispositivos se conectem diretamente à internet e ofereçam uma variedade de aplicações, como casas inteligentes e monitoramento de saúde móvel. Esse avanço também está presente na indústria, onde são implantados dispositivos de IIoT que incluem sensores, atuadores e dispositivos móveis, impulsionando a comunicação móvel nas fábricas inteligentes, fornecendo

dados em massa sobre diversos parâmetros. No entanto, muitas PMEs ainda não adotaram essas tecnologias, continuando a operar de maneira convencional e perdendo as oportunidades oferecidas pela IoT (PRIYASHAN; THILAKARATHNE, 2020).

A IIoT é uma extensão do conceito de IoT, focada especificamente no uso industrial. Ela envolve a conexão de máquinas e dispositivos em ambientes de produção, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real, o que resulta em otimização de processos, aumento da eficiência e redução de custos (QIU et al., 2020; JAIN; CHANDRASEKARAN, 2022).

Qiu et al. (2020) complementam em seu estudo que a *edge computing* na IIoT pode reduzir a latência na tomada de decisões, economizar recursos de largura de banda e proteger a privacidade, com aplicações potenciais em prognósticos, gestão de saúde, redes inteligentes, coordenação de fabricação e veículos conectados inteligentes.

De acordo Khan e Javaid (2022) a IIoT é considerada uma parte fundamental da quarta revolução industrial, também conhecida como I4.0, e está transformando a maneira como as indústrias operam, desempenhando um papel decisivo na I4.0, aumentando a eficiência e reduzindo os custos de produção ao permitir fábricas inteligentes através de máquinas e dispositivos conectados à internet.

Para Serpanos et al. (2018), discute-se a arquitetura funcional dos sistemas de IIoT e a integração de sistemas de controle industrial (ICS) com sistemas de tecnologia da informação (TI). A integração da IIoT com ICS e TI apresenta vários desafios devido aos diferentes caminhos de evolução e requisitos desses sistemas. No entanto, também oferece oportunidades para maior flexibilidade, produtividade e redução de custos nas indústrias.

O estudo de Mukherjee et al. (2024) identificou fatores que podem impactar a adoção da IIoT em PMEs para melhorar o desempenho organizacional. Oito hipóteses foram aceitas, incluindo vantagem relativa, compatibilidade, confiança, suporte da alta gerência, capacidade técnica, pressão competitiva, inovação e desempenho organizacional. Quatro hipóteses foram rejeitadas, incluindo infraestrutura, prontidão organizacional, experiência anterior e excelência interna.

As aplicações da IIoT em PMEs são diversas e podem ajudar essas organizações a se tornarem mais competitivas. Por exemplo, a implementação da IIoT pode levar a uma melhor gestão de ativos, manutenção preditiva, monitoramento e manutenção remota, e desenvolvimento de novos modelos de negócios (MUKHERJEE et al., 2024; JIWANGKURA; SOPHATSATHIT; CHANDRACHAI, 2020). Além disso, a integração de tecnologias de ponta, como computação em nuvem, aprendizado de máquina e análise de *big data*, pode

permitir que as PMEs obtenham ideias significativas a partir dos dados obtidos, melhorando a tomada de decisões e a satisfação do cliente (ROY; ROY, 2019; YOUNAN et al., 2020).

No estudo conduzido por Jiwangkura, Sophatsathit e Chandrachai (2020), a pesquisa está centrada na implementação de estratégias de IIoT com Interação Humano-Computador (HCI) voltadas para as PMEs, visando auxiliá-las na adoção da IIoT e na maximização de seu valor. As descobertas revelam aspectos significativos no processo de adoção, tais como flexibilidade adaptável, natureza não monótona das tarefas da nova HCI, capacidade de tomada de decisões em tempo real por parte da alta gerência e identificação de oportunidades de mercado.

No entanto, a adoção da IIoT para as PMEs enfrenta desafios, incluindo a necessidade de infraestrutura adequada, prontidão organizacional, experiência prévia e fatores humanos, como a flexibilidade e o treinamento dos funcionários (MUKHERJEE et al., 2024). As estratégias de implementação da IIoT devem considerar esses desafios e focar em fatores tecnológicos, organizacionais, ambientais e humanos para garantir uma transição suave e eficaz para a I4.0 (MUKHERJEE et al., 2024; JIWANGKURA; SOPHATSATHIT; CHANDRACHAI, 2020).

De acordo com Younan et al. (2020), a IoT é responsável por gerar grandes volumes de dados, comumente referidos como *big data*, devido à proliferação de dispositivos conectados e à coleta incessante de informações provenientes de diversas fontes. Para enfrentar esses desafios, os mesmos autores afirmam que a integração das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) é considerada fundamental. Ferramentas tecnológicas como fusão de dados, aprendizado de máquina, análise de *big data*, computação em nuvem e *blockchain* são identificadas como recursos capazes de aprimorar a análise e a investigação dos dados gerados pela IoT (YOUNAN et al., 2020).

De maneira geral, a IIoT oferece às PMEs a oportunidade de melhorar o desempenho organizacional e criar vantagens competitivas em um mercado cada vez mais digitalizado e interconectado. A adoção bem-sucedida da IIoT pode resultar em operações mais eficientes, inovação de produtos e serviços e uma maior capacidade de resposta às demandas do mercado (MUKHERJEE et al., 2024; JAIN; CHANDRASEKARAN, 2022).

2.2 Gestão da Produção

A gestão da produção envolve o planejamento, coordenação e controle de processos industriais e de fabricação para garantir a utilização eficiente de recursos, qualidade dos produtos e otimização do sistema de produção, desta forma, a gestão da produção tradicional

depende fortemente da monitoração, governança e contribuição humana (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Além disso, argumenta-se que os benefícios da I4.0 ainda não foram plenamente experimentados, a qual se compromete a integrar mais indivíduos à economia global, solucionar externalidades negativas, como as emissões de carbono, e transformar organizações para maximizar o uso dos recursos digitais (SCHWAB, 2019).

A adoção da I4.0 nas PMEs oferece benefícios como flexibilidade, eficiência de custos, qualidade e vantagem competitiva, mas as restrições financeiras e de conhecimento são os principais desafios (MASOOD; SONNTAG, 2020).

Conforme Priyashan e Thilakarathne (2020), a estrutura IIoT em PMEs pode otimizar suas instalações de produção gerenciando e monitorando parâmetros de produção em tempo real, melhorando a qualidade e a produtividade.

O uso de sensores e dispositivos interconectados, como parte do conceito de I4.0, tem se mostrado fundamental para a melhoria dos processos produtivos. Através da coleta de dados em tempo real, é possível realizar uma manutenção preditiva eficaz, identificando padrões que antecedem falhas e defeitos, permitindo prever falhas futuras (CAO, 2020).

Para Florescu e Barabas (2022), a I4.0 representa uma revolução na gestão da produção, trazendo consigo uma série de benefícios que transformam as operações industriais. A integração de sistemas de produção eficientes com o conceito de I4.0 desafia as empresas a adaptarem seus processos para aumentar o desempenho operacional e organizacional por meio da digitalização e conectividade. A implementação de tecnologias da I4.0 tem sido associada ao aumento da qualidade do produto e à eficiência dos processos de fabricação (TORTORELLA; FETTERMANN, 2018).

Um dos principais benefícios é a melhoria dos processos de produção por meio da reconfiguração rápida e flexível, onde conceitos de *Lean* e tecnologias da I4.0, como gêmeos digitais e simulação, são integrados, afirma Tortorella e Fettermann (2018), além disso, para a adoção de práticas de produção enxuta em conjunto com a I4.0 pode levar a melhorias significativas no desempenho.

A I4.0 também promete ganhos de produtividade para empresas que conseguem implementá-la, ao mesmo tempo em que depende de recursos naturais, impactando o meio ambiente. Estratégias de produção mais limpas associadas à I4.0 podem otimizar sistemas de manufatura e reduzir os impactos ambientais (SATYRO et al., 2023). A integração da I4.0 com a economia circular pode desbloquear a circularidade dos recursos dentro das cadeias de suprimentos, promovendo operações sustentáveis (JABBOUR et al., 2018).

De acordo com Fettermann et al. (2018), outro aspecto importante é a contribuição da I4.0 para a gestão de operações, com benefícios mais concentrados em áreas como gestão de tecnologia e manufatura *just-in-time*. A maturidade dos casos de sucesso analisados ainda é incipiente, indicando um potencial para aumento da produtividade após a aplicação dessas tecnologias.

A I4.0 pode aprimorar práticas *Lean* existentes, embora os impactos da implementação de novas tecnologias em práticas *Lean* estabelecidas ainda não estejam claros. A revisão sistemática da literatura realizada por Pereira et al. (2019), sugere que as tecnologias disruptivas emergentes podem realçar práticas *Lean* e analisar seus impactos e benefícios para organizações que estão se movendo em direção a esse novo paradigma industrial.

Além disso, uma metodologia sustentável usando manufatura enxuta e inteligente para a produção mais limpa de gestão de chão de fábrica na I4.0 foi desenvolvida, visando melhorar a produtividade dentro de restrições limitadas, abordando questões como segurança do trabalhador e qualidade do produto (TRIPATHI et al., 2022).

2.2.1 Maior Eficiência e Produtividade

O conceito de fábrica inteligente, usando tecnologias como IIoT e gêmeos digitais, busca visibilidade integral e flexibilidade de produção, enquanto a I4.0 impulsiona cadeias de suprimentos sustentáveis (KONSTANTINIDIS et al., 2022).

A integração de tecnologias como IIoT, computação em nuvem, *big data* e IA na I4.0 permite otimizar o uso de recursos e elevar os níveis de eficiência e produtividade na manufatura (ZHONG et al., 2017).

Sensores e dispositivos interconectados em máquinas, produtos e sistemas logísticos geram uma grande quantidade de dados em tempo real que refletem o status das operações (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). A análise avançada desses dados pela empresa viabiliza o monitoramento remoto contínuo, detecção preditiva de problemas e coordenação inteligente da cadeia de suprimentos.

Tecnologias como manutenção preditiva baseada em *machine learning*, realidade aumentada (RA) para suporte à produção e robôs autônomos e colaborativos reduzem paradas não planejadas, elevam a utilização de ativos e eliminam gargalos e interrupções (WANG et al., 2016). A automatização de tarefas repetitivas libera mão de obra humana para atividades de maior valor agregado.

Simulações e gêmeos digitais viabilizam projetar e testar virtualmente alternativas para otimizar fluxos, *layouts* e parâmetros do processo produtivo (TAO et al., 2018).

Para Zheng (2018), os sistemas de manufatura inteligentes permitem maior flexibilidade e agilidade na resposta às demandas do mercado, permitindo uma rápida reconfiguração e adaptação dos processos de produção.

A detecção automática de eventos recorrentes em séries temporais multivariadas, como padrões de falha, é outra aplicação relevante, utilizando técnicas de mineração de dados para desenvolver métodos avançados de monitoramento e prever falhas iminentes, reduzindo assim o tempo de inatividade das máquinas (KAPP et al., 2020). A previsão de falhas em dispositivos IoT e o tempo de manutenção também podem ser aprimorados com o uso de algoritmos de IA e aprendizado de máquina, como demonstrado por Devi et al. (2022).

Conforme estudo de Roy e Roy (2019), o surgimento de tecnologias disruptivas, como IoT e o *big data*, está transformando as indústrias e tornando-as mais inteligentes. Ainda os autores discutem o conceito de Sistema de Gerenciamento Inteligente (*Smart Management System* – SMGs) e seus benefícios potenciais para as indústrias no século 21. Eles destacam o papel da IoT e da *big data* em permitir que as PMEs melhorem o desempenho, o design do produto, a cadeia de suprimentos e a satisfação do cliente.

2.2.2 Maior Flexibilidade e Agilidade

A I4.0 permite reconfigurar e adaptar dinamicamente os sistemas de produção para responder com agilidade a mudanças de demanda, introdução de novos produtos e customização em massa (ZHONG et al., 2017).

A integração de máquinas, CPS e soluções de TI em arquiteturas modulares possibilita reorganizar, expandir ou modificar facilmente a estrutura produtiva conforme necessário, assim diferentes estações podem ser re combinadas para fabricar novos produtos com rapidez (LEE et al., 2015).

Algoritmos de IA e gêmeos digitais simulam alternativas e identificam as melhores configurações em termos de sequenciamento, parâmetros e alocação de recursos, permitindo adaptação em tempo real (TAO et al., 2018).

A conexão em rede de máquinas e sistemas logísticos viabiliza o rápido escalonamento ou reescalonamento dinâmico da produção para atender variações no mix de produtos demandados (ZHONG et al., 2017).

Um sistema de manutenção em tempo real baseado em processamento de borda e IA para controle e diagnóstico de manufatura industrial demonstra a capacidade de prever modos de falha antes que ocorram, integrando monitoramento de condição, detecção de falhas e

diagnóstico com algoritmos de aprendizado de máquina e aprendizado profundo (VERMESAN et al., 2022).

2.2.3 Melhor Controle de Qualidade

Em uma recente implementação relatada por Belli et al. (2019), que descreve a transformação em curso de uma indústria de manufatura, onde a primeira fase envolve a digitalização do controle de qualidade nas linhas de produção, substituindo folhas de papel por um aplicativo digital baseado na *web*, que oferece suporte aos operadores e inspetores de qualidade por meio de dispositivos inteligentes, em seguida, na segunda fase, em andamento, concentra-se na digitalização e otimização do planejamento de produção, utilizando uma nova ferramenta baseada na *web*.

A I4.0 introduz tecnologias avançadas de sensoriamento, conectividade, análise de dados e automação que levam a ganhos significativos no controle de qualidade da produção (ZHU et al., 2018; LEE et al., 2015).

Na indústria de moldagem por injeção de plástico, os parâmetros do processo desempenham um papel vital na qualidade do produto. Durante a fabricação, esses parâmetros lidam com vários fatores, como a qualidade dos materiais, tolerâncias do produto e condições ambientais. Para muitas PMEs, alcançar padrões de qualidade enquanto reduzem os custos na moldagem por injeção tem sido um desafio (PRIYASHAN; THILAKARATHNE, 2020). Nesse contexto, os autores propõem uma infraestrutura IIoT para converter um molde de injeção à frio convencional em uma ferramenta habilitada para IoT.

O amplo uso de sensores e dispositivos interconectados gera grandes volumes de dados sobre todas as etapas e condições do processo produtivo (TAO et al., 2018; WANG et al., 2016). Esses dados são analisados em tempo real por algoritmos de IA para identificar padrões, detectar defeitos e prever falhas com alta precisão (WANG; 2022).

As tecnologias da I4.0 facilitam o rastreamento e a transparência de materiais, insumos e produtos ao longo de toda a cadeia produtiva, desde fornecedores até o cliente final (WANG et al., 2020). Isso aumenta a responsabilização, qualidade e conformidade em todos os elos.

Além disso, a análise de falhas críticas e a interação entre diferentes parâmetros do processo produtivo podem ser melhoradas com o uso de CPS e a IIoT, como proposto em um modelo de fábrica inteligente que visa prever falhas críticas e monitorar o processo em tempo real (AHMAD, 2018). A IA também tem um papel transformador no controle de qualidade, com técnicas de análise de imagem e aprendizado de máquina melhorando a detecção de defeitos e a eficiência da produção (PEKER, 2023).

A tecnologia IoT permite a coleta de dados em tempo real em todas as etapas do processo produtivo, facilitando a análise de *big data* para previsão e otimização da qualidade do produto (ZHANG et al., 2022). A análise inteligente de dados também é importante para detectar e prever falhas em equipamentos mecânicos, utilizando tecnologias de IA e sensores inteligentes (KOVITO, 2022).

2.3 Lean Manufacturing e a Indústria 4.0

Em 1949, a Toyota iniciou um processo de otimização de suas operações, implementando uma estratégia contínua de eliminação de desperdícios. Taiichi Ohno, o criador do Sistema de Produção Toyota (TPS), formulou um conjunto de métodos e princípios coordenados para gerenciar as plantas de produção, os quais se tornaram os fundamentos da filosofia *Lean*. Ele enfatizou que o cerne do *Lean* está na redução do tempo decorrido entre o pedido do cliente e a entrega final do produto, mediante a eliminação de todas as atividades consideradas desperdício e que não agregam valor ao cliente (OHNO, 2019).

Os primeiros textos sobre a teoria da *Lean Manufacturing* (LM) foram lançados em inglês em 1978 e obtiveram destaque particular na indústria automotiva. Desde então, ao longo das últimas décadas, têm surgido numerosos artigos e livros que exploram a descrição e a análise do conteúdo da LM, como destacado por Tortorella e Fettermann (2018).

As tecnologias da IoT e IIoT estão transformando o setor de manufatura, permitindo que as empresas se tornem mais eficientes e ágeis, a aplicação de IoT e IIoT no LM está revolucionando a maneira como as indústrias operam, integrando tecnologias como aprendizado de máquina, *big data* e *analytics*, dados de sensores, comunicação M2M e automação (PICCIALLI; BESSIS; CAMBRIA, 2021).

O IIoT está impulsionando setores como manufatura, automotivo e saúde, coletando e analisando dados de sensores de produção e utilizando ferramentas de análise de negócios para otimizar processos de produção e aumentar a competitividade (PICCIALLI; BESSIS; CAMBRIA, 2021). Além disso, o uso de aprendizado de máquina para manutenção preditiva de máquinas industriais, utilizando dados de sensores IoT, está melhorando a qualidade e reduzindo os custos de manutenção, o que é essencial para o processo de manufatura (KANAWADAY; SANE, 2017).

Uma revisão de aplicações de tecnologias habilitadoras realizada por Gokilakrishnan et al. (2023), destaca a importância da aplicação de elementos convencionais de IoT em aplicações industriais, melhorando os processos de manufatura por meio de desenvolvimentos tecnológicos eficientes e sustentáveis. A arquitetura da empresa de manufatura também está

sendo influenciada pelo IIoT, que aumenta o nível de gestão da produção e acelera a tomada de decisões gerenciais, resultando em produtos de maior qualidade (LEVINA et al.; 2020).

Apesar dos avanços, a aplicabilidade do IIoT em muitas áreas ainda não foi totalmente explorada e permanece imprevisível. A evolução do IIoT é comparável à da Internet nos anos 90, começando lentamente e ganhando impulso para se tornar um aspecto quase indispensável da vida humana no século 21. A robótica e o controle já fazem parte da maioria das empresas de manufatura, mas quando se trata de aplicações em tempo real, o IIoT pode enfrentar desafios significativos (SREEDHARAN; 2023).

A manufatura inteligente é uma tendência emergente, refletindo o impacto de tecnologias de ponta como IoT, *big data*, IA (AI) e computação em nuvem. A transformação digital das indústrias é essencial para aumentar a produtividade e modernizar as tecnologias de manufatura e logística da cadeia de suprimentos. O IIoT é uma forma de transformação digital na manufatura, utilizando dados de sensores de comunicação M2M e tecnologias de automação. Uma das aplicações mais recentes do IIoT é o *Digital Twin*, que é muito útil na simulação de máquinas (RAJARAJAN; RENUKADEVI; MOHAMMED ABU BASIM, 2021).

A revisão da literatura sobre a integração do LM com a I4.0, ou *Lean 4.0*, revela uma tendência crescente na busca por sistemas de produção e gestão eficientes que se adaptam às novas tecnologias disruptivas. O estudo realizado por Florescu e Barabas (2022) propõe uma análise de ferramentas *Lean* e tecnologias da I4.0 para compatibilidade, fornecendo um modelo de integração em aplicações industriais. A pesquisa destaca que a implementação do *Lean* em sistemas de manufatura flexíveis, juntamente com técnicas da I4.0, como gêmeos digitais e simulação, resulta em processos de produção aprimorados.

No contexto brasileiro, a implementação de tecnologias da I4.0 em empresas de manufatura mostra uma associação positiva com práticas de produção enxuta, levando a melhorias significativas no desempenho. O estudo implementado por Tortorella e Fettermann (2018) utiliza dados de uma pesquisa com 110 empresas e analisa a relação entre práticas *Lean* e a implementação da I4.0, concluindo que a implementação conjunta dessas abordagens é benéfica.

A integração do *Lean Six Sigma* com as tecnologias da I4.0 também é explorada, visando a excelência operacional. O trabalho de Chiarini e Kumar (2021) sugere que a integração requer ferramentas de mapeamento reinventadas e implica uma integração horizontal e vertical, *end-to-end*, para alcançar a sincronização automática dos processos.

A pesquisa de Vlachos et al. (2023) foca em um plano de automação *Lean* para a integração de Veículos Guiados Autônomos (AGVs) e IoT, demonstrando que a implementação

de AGVs deve incluir fases de design, integração e melhoria contínua, alinhando fatores sociais, técnicos e operacionais.

Uma análise bibliométrica, realizada por Kumar et al. (2024), identifica os principais componentes de pesquisa na integração do LM com a I4.0, destacando a importância de modelos conceituais e *frameworks* para essa integração e o impacto combinado nas performances operacionais.

O estudo de Sanders, Elangeswaran e Wulfsberg (2016) argumenta que as atividades de pesquisa em I4.0 funcionam como facilitadores para o LM, oferecendo soluções para superar barreiras na implementação do *Lean* e sugerindo que a adoção da I4.0 pode tornar uma fábrica não apenas inteligente, mas também enxuta.

A revisão sistemática de Saad et al. (2021) busca entender se a manufatura enxuta e as tecnologias da I4.0 podem ser efetivamente integradas, considerando a necessidade de produção modular e flexível para atender à demanda do cliente e à personalização do produto.

O estudo de Da Silva Souza e Bonamigo (2023) apresenta os benefícios da integração do LM com as tecnologias da I4.0, utilizando uma revisão sistemática da literatura para integrar várias ferramentas *Lean* com tecnologias-chave da I4.0. Os autores destacam que o uso de tecnologias da I4.0, como nuvem, análise de *big data*, AGVs e RA em conjunto com ferramentas *Lean*, fornece um fluxo contínuo, transparente, automatizado e orientado ao cliente de produtos e informações.

De acordo com Tripathi et al. (2022), uma metodologia sustentável que utiliza manufatura enxuta pode melhorar a gestão do chão de fábrica e a produtividade dentro de restrições limitadas, abordando questões como segurança do trabalhador e qualidade do produto.

As PMEs enfrentam vários desafios no mercado global, incluindo recrutamento e retenção de talentos, competitividade, integração digital e acesso ao financiamento. A escassez de mão de obra, é um obstáculo à recuperação econômica de muitas empresas de manufatura em Quebec (ABDULNOUR et al., 2022). Segundo os mesmos autores, para melhorar a competitividade, as PMEs frequentemente recorrem a programas de aprimoramento *Lean* e *Six Sigma* para aumentar a eficiência. Além disso, elas precisam se adaptar à demanda por produtos personalizados, migrando da produção em massa para a produção personalizada em grande escala.

A posição apresentada no estudo Kolberg e Zühlke (2015) discute a combinação do *Lean Production* com a tecnologia de automação, destacando exemplos de como a I4.0 pode

apoiar o *Lean*, como relógios inteligentes para o princípio *Andon* ou CPS para um agendamento de produção *Kanban* flexível.

Por fim, o estudo Mrugalska e Wyrwicka (2017) aborda a coexistência e o suporte mútuo entre *Lean Production* e I4.0, questionando como essas duas abordagens podem se integrar em um ambiente de fábrica inteligente.

Em suma, a literatura sugere que a integração do LM com a I4.0 pode levar a melhorias significativas na eficiência e na flexibilidade dos processos de produção, com a convergência dessas abordagens oferecendo vantagens competitivas no cenário industrial atual.

2.3.1 *Lean 4.0*

Lean 4.0 (L4.0), é uma abordagem que combina as práticas tradicionais de LM com as tecnologias avançadas da I4.0, envolve a redução de desperdícios e o aumento da produtividade para uma cadeia de suprimentos de produção sustentável (ZHOU, 2016). O L4.0 é uma forma transformada do *Lean* tradicional para atender aos requisitos da I4.0, ele tem o potencial de enfrentar os desafios do I4.0 em termos de velocidade, dinâmica e eficácia, uma vez digitalizado (QURESHI et al., 2023).

A pesquisa de Ejsmont et al. (2020), combina os princípios de LM e I4.0 para impulsionar a produtividade, qualidade e eficiência nas empresas. Enquanto o gerenciamento enxuto se concentra na eliminação do desperdício e na melhoria contínua, a I4.0 utiliza tecnologias como CPS e IoT para otimizar os processos de criação de valor. Os autores afirmam, que essa fusão de abordagens é vista como essencial para aprimorar a excelência operacional e reduzir o desperdício de forma ainda mais eficaz.

A filosofia *Lean*, que foca na melhoria da qualidade e do serviço, eliminação de desperdícios, redução de tempo e custos, e aumento da eficácia organizacional, é relevante para PMEs que buscam manter sua competitividade em um mercado (ZHOU, 2016).

Para Qureshi et al. (2023), a aplicação do L4.0 em PMEs envolve a adoção de práticas tanto leves quanto duras. As práticas leves incluem liderança da alta gestão, foco no cliente e treinamento e aprendizado dos funcionários, enquanto as práticas duras abrangem manutenção produtiva total (TPM), controle estatístico de processos e tecnologias avançadas de produção. A integração dessas práticas é essencial para a preparação das PMEs para o I4.0, resultando em uma influência significativa na prontidão operacional e prontidão tecnológica.

Além disso, segundo Busto Parra, Pando Cerra e Álvarez Peñín (2022), a combinação de sistemas de planejamento de recursos empresariais com a filosofia *Lean* e as tecnologias de informação e comunicação pode resultar em melhorias significativas na capacidade de gestão e

eficiência dos processos de produção, conforme demonstrado em um estudo de caso em uma empresa de fabricação de metal na Espanha.

O L4.0 propõe uma nova abordagem holística para a integração de ferramentas de LM e tecnologias digitais, identificando pontos de sinergia entre as ferramentas LM e tecnologias como *big data analytics*, *cloud*, simulação virtual e RA. Isso resulta em contribuições significativas para *Just in Time* 4.0 (JIT 4.0), *Kaizen* 4.0, *Kanban* 4.0, *Poka-Yoke* 4.0, *Value Stream Mapping* 4.0 (VSM 4.0) e *Total Productive Maintenance* 4.0 (TPM 4.0), destacando a integração entre processos, dispositivos e partes interessadas, minimização de desperdícios e autonomia, apontando para ganhos para a organização a partir desta abordagem de integração holística (VALAMEDE; AKKARI, 2020).

A implementação bem-sucedida do L4.0 em PMEs pode levar a melhorias na produtividade, redução de desperdícios, vantagem competitiva e um sistema de manufatura sustentável, combinando práticas tradicionais de *Lean* com tecnologias habilitadas pela I4.0 (QURESHI et al., 2023).

A simulação é uma ferramenta útil para auxiliar na tomada de decisões durante a implementação do I4.0, ajudando as PMEs a entenderem melhor a interação entre *Lean* e I4.0 e a desenvolver estratégias de implementação do *Lean* 4.0 adaptadas ao contexto de produção em massa personalizada (ABDULNOUR et al., 2022).

A combinação de ferramentas *Lean* com tecnologias I4.0, como o Sistema de Manufatura Inteligente e Sustentável, pode otimizar processos de produção, usando ferramentas *Dynamic Lean* 4.0, como VSM, SMED e Digital Poka-Yoke, resultando em impactos sociais positivos, com um aumento no rendimento da produção de 99,44% para 100% e criou um ambiente de trabalho mais seguro, com desempenho econômico aprimorado e menor impacto ambiental, afirma o estudo de Rahardjo et al. (2023).

O LM pode apoiar a melhoria contínua no mundo da I4.0, integrando novas tecnologias e focando na melhoria contínua, envolvendo a cadeia de suprimentos, sistemas puxados e tendo um foco no cliente (SAXBY; CANO-KOUROUKLIS; VIZA, 2020).

2.4 Implementação de Conectividade em Máquinas Legadas

Para que as PMEs possam se integrar à I4.0, é essencial equipar suas máquinas legadas com capacidades de detecção e comunicação. Contudo, como a maioria desses equipamentos foi fabricada antes da revolução da I4.0, a adaptação dessas funcionalidades representa um desafio substancial. Ho, Lai e Liu (2022) destacam que a inserção de sensores e dispositivos de monitoramento em equipamentos legados é uma solução prática que desperta crescente

interesse devido ao seu potencial em aplicações industriais, especialmente em ambientes de produção heterogêneos.

Um exemplo de aplicação prática é o sistema de monitoramento desenvolvido por Soto-Ocampo et al. (2020), que utiliza um sistema de baixo custo baseado em Raspberry Pi para monitorar vibrações em rolamentos de máquinas rotativas. A coleta de dados de vibração permite detectar falhas antes que comprometam o desempenho da máquina, melhorando a precisão e prevenindo paradas inesperadas. O sistema monitora até quatro níveis de severidade em falhas de rolamentos, demonstrando que o uso de sensores de baixo custo é viável para PMEs que buscam prolongar a vida útil de suas máquinas sem investimentos elevados (SOTO-OCAMPO et al., 2020).

A Universidade de Cambridge também desenvolveu o programa denominado Shoestring, descrito por Hawkrige et al. (2021), que visa tornar a digitalização acessível para PMEs por meio de sensores econômicos e interfaces de fácil implementação. Sensores de temperatura e vibração monitoram o desempenho de uma impressora 3D em tempo real, contribuindo para o aumento da eficiência produtiva e redução de custos operacionais. O programa explora tecnologias como Arduino e Node-RED para gerenciar dados sem necessidade de conhecimento técnico avançado, permitindo que pequenas empresas avancem gradualmente rumo à digitalização (HAWKRIDGE et al., 2021).

O estudo de Vuković et al. (2022) fornece outro exemplo relevante, focando na implementação de sensores em máquinas de brochamento legadas para monitorar e analisar o processo de produção. Nesse projeto, foram integrados sensores que registram dados operacionais críticos, ajudando as PMEs a reduzir desperdícios e otimizar processos. Esse tipo de digitalização oferece resultados imediatos e escaláveis, permitindo uma expansão gradual da transformação digital na fábrica como um todo (VUKOVIĆ et al., 2022).

No contexto de digitalização de baixo custo, Lockwood et al. (2018) descrevem uma solução que exemplifica a viabilidade econômica da I4.0 para PMEs. Sensores de baixo custo foram instalados em um torno Colchester Bantam de 1956 e em uma fresadora Bridgeport dos anos 1980, com monitoramento contínuo de condições e desempenho. Essa configuração permitiu o cálculo do OEE e o monitoramento de custos operacionais, demonstrando que mesmo máquinas antigas podem ser digitalizadas de forma econômica para otimizar processos e ampliar a competitividade (LOCKWOOD et al., 2018).

Em um estudo similar, Durigan et al. (2023) demonstraram que a instrumentação de baixo custo permite modernizar equipamentos antigos sem um investimento proibitivo. Sensores econômicos foram instalados em um torno universal para monitorar parâmetros como

velocidade de corte, avanço e vibração. Os dados coletados ajudaram a melhorar a qualidade superficial das peças usinadas e a eficiência do processo.

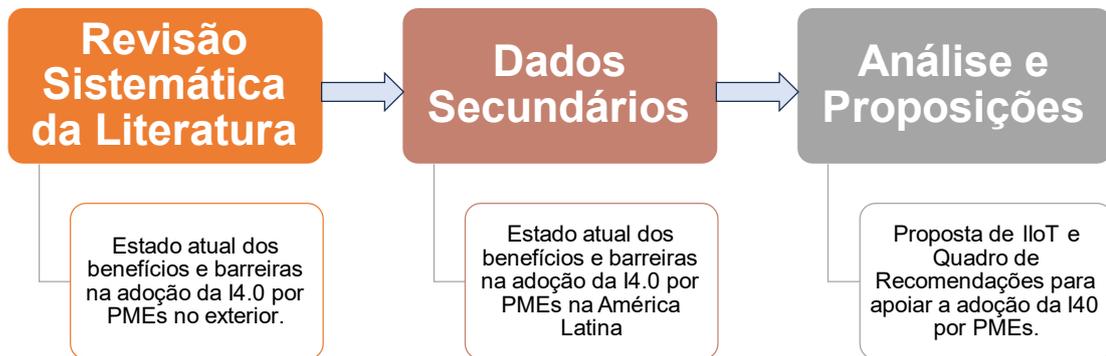
Por fim, Deshpande et al. (2023) desenvolveram o Computer Vision Toolkit (CVT) para digitalizar informações de máquinas legadas e transmitir dados para a nuvem, facilitando a manutenção preditiva e o monitoramento contínuo com dispositivos de realidade aumentada.

Esses exemplos ilustram o potencial das PMEs em adotar a digitalização de máquinas legadas utilizando soluções econômicas e de fácil aplicação. A conectividade de máquinas legadas com sensores de baixo custo não apenas melhora a manutenção e a produtividade, mas também viabiliza a coleta de dados essenciais para a otimização de processos. Esses avanços permitem que empresas de menor porte adotem práticas da I4.0 de maneira escalável e compatível com suas limitações orçamentárias e operacionais. Detalhes sobre os estudos desta seção são apresentados no Quadro D.1 no Apêndice D.

3 METODOLOGIA

A metodologia para identificar os principais benefícios e barreiras enfrentados pelas PMEs na adoção da I4.0, bem como uma proposição de uma PoC, foi estruturada em três fases sequenciais e complementares, conforme ilustrado na Figura 2, uma revisão sistemática da literatura, seguida por uma análise de dados secundários e finda com uma análise dos resultados e uma proposição de um IIoT.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Próprio autor (2024).

A etapa inicial consiste na Revisão Sistemática da Literatura onde é realizada uma análise abrangente e criteriosa da literatura existente, focada no cenário internacional, relacionada ao tema de pesquisa.

A etapa seguinte, dedicada à análise de dados secundários, foca na coleta de informações referentes a América Latina, com o objetivo de complementar e enriquecer a compreensão da mesma temática por meio de dados previamente publicados.

Na última etapa Análise e Proposições, os dados coletados por meio da revisão sistemática da literatura e dos dados secundários são analisados de forma aprofundada, culminando na elaboração de um quadro de recomendações e a implementação de um IIoT.

Esta abordagem integrada visa não apenas mapear o estado atual e a realidade local, mas também proporcionar uma base sólida para a elaboração de recomendações práticas para facilitar a adoção da I4.0 por PMEs, considerando suas especificidades e desafios.

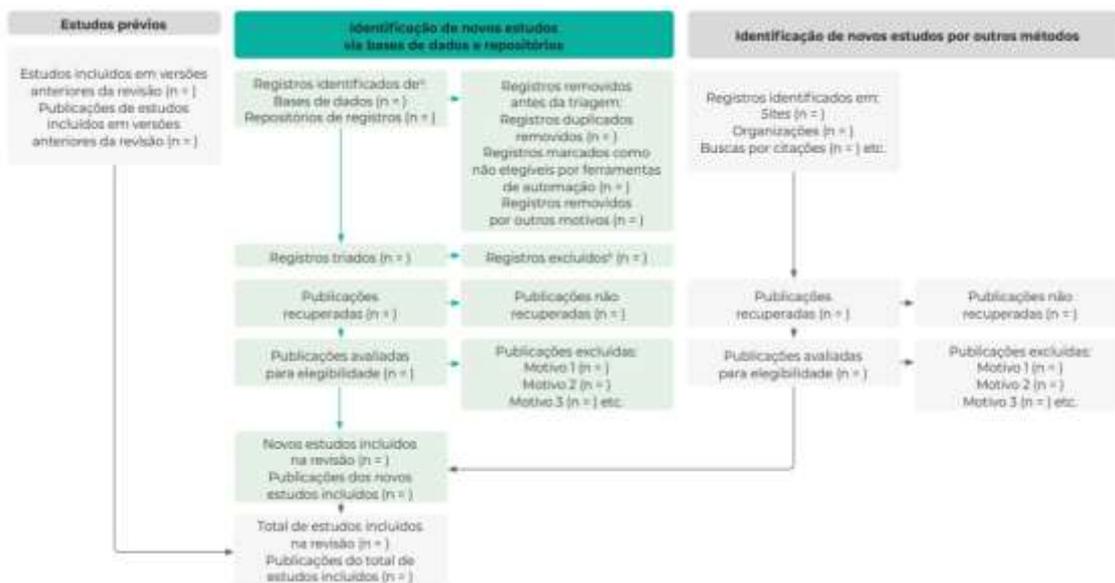
As etapas metodológicas delineadas neste estudo são detalhadas nas seções subsequentes, oferecendo uma visão aprofundada de cada fase do processo investigativo.

3.1 Revisão Sistemática da Literatura

A primeira etapa é a RSL, que visa compreender o estado atual dos benefícios e barreiras na adoção da I4.0 por PMEs no exterior. Essa fase envolve a coleta e análise de artigos científicos, relatórios e estudos de caso que abordem a implementação de tecnologias I4.0 em PMEs fora do Brasil. O objetivo é identificar padrões, desafios comuns e estratégias eficazes que possam ser comparadas com o contexto brasileiro.

Para conduzir a RSL, foi adotada a metodologia PRISMA 2020, uma abordagem reconhecida e amplamente utilizada por diversos autores, como Galvão (2022), Page et al. (2021), Rethlefsen (2021) etc., conforme referenciado na Figura 3.

Figura 3 – Metodologia PRISMA 2020



Fonte: Adaptada de GALVÃO (2022).

A metodologia PRISMA 2020 consiste em sete seções (título, resumo, introdução, métodos, resultados, discussão e outros itens), que abrangem 27 itens, alguns dos quais têm subitens. O PRISMA 2020 inclui uma lista de verificação específica para resumos de artigos de revistas e conferências em revisões sistemáticas. Essa lista para resumos é uma versão atualizada da declaração PRISMA de 2013, incorporando as novidades e modificações presentes no PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021).

Esta metodologia é estruturada em três etapas distintas e interligadas: a etapa de estudos prévios, que conta com a fase de identificação e inclusão, a etapa de identificação de novos estudos via base de dados e repositórios e a etapa de identificação de novos estudos por outros métodos. As duas últimas etapas contemplam as fases de identificação, triagem e inclusão.

Na etapa de estudos prévios, procedemos à seleção intencional de documentos para uma leitura preliminar sobre o tema em questão. As fontes incluíram uma variedade de materiais, como artigos de periódicos, artigos de conferência, livros, dissertações e revisões publicadas em diversos periódicos especializados. Essa fase inicial foi essencial para estabelecer uma compreensão inicial do panorama atual da literatura relacionada ao tema da pesquisa.

Após a etapa de estudos prévios, procede-se à fase de identificação de novos estudos por meio de bases de dados e repositórios. Nesse estágio, foca-se na busca por fontes primárias, principalmente artigos científicos, publicados em uma ampla variedade de periódicos acadêmicos. Para identificar os artigos relacionados ao tema de pesquisa, realizou-se uma busca na plataforma Scopus, com palavras-chave selecionadas de forma criteriosa para capturar os aspectos essenciais do objeto de estudo, estas incluíram: “*industry 4.0*”, *small and medium-sized enterprises* (SME), ou seja, “*sme*”, “*lean*” e “*production management*”. A combinação destas palavras-chave foi elaborada com o uso de operadores booleanos para garantir uma estratégia de busca abrangente e precisa. A estratégia de busca final ficou assim formulada: (*TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0") AND TITLE-ABS-KEY ("sme") OR TITLE-ABS-KEY ("lean") OR TITLE-ABS-KEY ("production management")*).

Para concluir, na etapa de identificação de novos estudos por outros métodos, adotou-se uma abordagem abrangente, utilizando três métodos distintos: pesquisa intencional, pesquisa por citação e exploração de recursos online. A pesquisa intencional permitiu o acesso a fontes específicas, como relatórios técnicos e teses. A pesquisa por citação foi aplicada para identificar estudos relevantes por meio da análise das referências citadas em artigos já incluídos na revisão. Além disso, recorreu-se à exploração de recursos online, como sites especializados e repositórios institucionais. Esses métodos complementares asseguraram a inclusão de uma diversidade de perspectivas e evidências na RSL.

3.2. Dados Secundários

A segunda etapa consiste na análise de dados secundários para investigar o estado atual dos benefícios e barreiras na adoção da I4.0 por PMEs no Brasil. Além disso, essa etapa fornecerá uma base empírica para entender a situação específica das PMEs brasileiras em comparação com as internacionais.

A utilização de dados secundários tem se mostrado uma metodologia eficiente em pesquisas sobre IoT e I4.0, permitindo a análise de padrões de adoção e tendências emergentes sem necessidade de coleta primária de dados. Estudos como o de Bazan e Estevez (2021) aplicaram essa abordagem para mapear desafios e contribuições na gestão de processos de

negócios. Xu et al. (2020) utilizaram relatórios consolidados em revisões sistemáticas para investigar soluções baseadas em blockchain e IoT. Além disso, essa metodologia possibilitou análises comparativas entre indústrias, como demonstrado por Nagy et al. (2018), que identificaram o impacto das ferramentas IoT na transformação digital e na competitividade empresarial na Hungria. Por fim, Goknil et al. (2023) exploraram dados secundários para identificar lacunas na qualidade dos dados e propor melhores práticas para sistemas ciberfísicos e IoT. Essas evidências destacam a relevância dos dados secundários para análises estratégicas, permitindo maior agilidade e redução de custos nas pesquisas.

Nesta pesquisa, os dados secundários desempenham um papel essencial para a compreensão da adoção da IoT em PMEs. A fonte secundária trata-se do relatório denominado o IoT Snapshot 2024 (LOGICALIS, 2024), um estudo conduzido pela Logicalis, que fornece uma visão abrangente do progresso e dos desafios da adoção da IoT na América Latina.

A Logicalis é uma empresa global que emprega mais de 6.400 profissionais e atende cerca de 10.000 clientes, com uma receita anual de USD 1,65 bilhão. Na América Latina, a empresa conta com mais de 3.000 colaboradores distribuídos em doze países. Originalmente especializada em integração de redes, a Logicalis consolidou-se como uma facilitadora da transformação digital, fornecendo soluções globais e serviços gerenciados. A empresa é afiliada à Datatec Limited, listada na bolsa de valores de Johannesburg, com um faturamento superior a USD 5,2 bilhões (LOGICALIS, 2024).

O relatório IoT Snapshot 2024 apresenta uma amostra robusta e diversificada de 246 respondentes, distribuídos entre o Brasil e quatro países da América Hispânica: Argentina, Chile, Colômbia e México. A escolha desses países justifica-se por representarem algumas das maiores economias da América Latina, proporcionando uma visão regional consistente sobre a maturidade e os desafios na adoção de tecnologias de IoT.

A maior concentração de respondentes encontra-se no Brasil, com 125 participantes, correspondendo a aproximadamente 51% do total. Isso reflete o protagonismo do país na adoção de IoT e transformação digital na região. A América Hispânica, com 121 respondentes no total, foi segmentada entre México (45), Colômbia (37), Argentina (21) e Chile (18). Essa divisão permite identificar não apenas a maturidade individual dos países em relação à adoção de IoT, mas também detectar tendências e desafios comuns que permeiam o contexto regional.

Além da abordagem quantitativa, o estudo incluiu entrevistas qualitativas em profundidade com 12 executivos de diferentes setores. Essa metodologia mista é relevante por permitir que dados numéricos sejam contextualizados, enriquecendo a compreensão das dinâmicas de adoção de IoT. O uso de uma amostra diversificada e representativa favorece a

validade externa do estudo, ampliando a aplicabilidade dos resultados para diversos setores da economia.

A distribuição dos respondentes reflete a heterogeneidade econômica e tecnológica da América Latina. No Brasil, por exemplo, o mercado já apresenta maior maturidade, o que pode ser percebido pela concentração de projetos em fase de produção. Nos demais países, como México e Colômbia, observa-se um crescente interesse pela tecnologia, ainda que o desenvolvimento se encontre, em alguns casos, em estágio inicial ou intermediário. Esses dados indicam que, embora haja diferenças entre os níveis de maturidade, a adoção de IoT é uma tendência em expansão em toda a região.

A utilização de dados secundários, como os fornecidos pelo IoT Snapshot 2024, está alinhada às melhores práticas metodológicas sugeridas por Creswell (2012), Yin (2016) e Flick (2009). Esses autores destacam que dados secundários, ou seja, informações coletadas por terceiros para finalidades distintas da pesquisa atual, oferecem uma base sólida para novos estudos ao fornecer contexto e informações valiosas. Além disso, essa abordagem permite a comparação com dados primários, ampliando as perspectivas e enriquecendo a análise. Flick (2009) enfatiza a importância de documentar cuidadosamente os dados para garantir a precisão e a relevância das informações utilizadas.

Contudo, o uso de dados secundários também apresenta desafios. É necessário avaliar o contexto em que os dados foram gerados, considerando possíveis vieses institucionais e limitações na coleta original (Yin, 2016). Ao mesmo tempo, a integração entre dados secundários e primários pode aprimorar a qualidade da pesquisa, ampliando o alcance das conclusões e otimizando a eficiência dos processos investigativos.

A incorporação de dados secundários nesta pesquisa possibilita uma triangulação eficaz entre literatura acadêmica e relatórios setoriais, conforme sugerido por Yin (2016). Essa abordagem robusta contribui para uma compreensão integrada das dinâmicas envolvidas na adoção da IIoT em PMEs, fornecendo uma base sólida para conclusões fundamentadas e alinhadas às melhores práticas metodológicas.

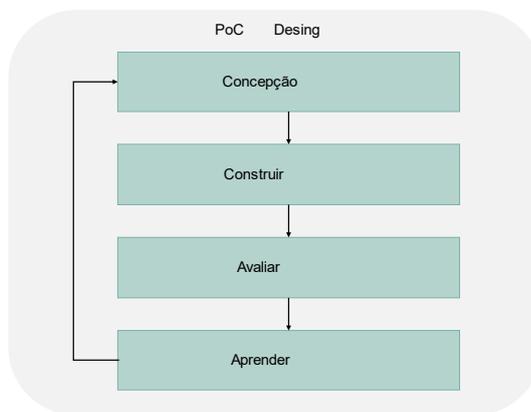
3.3 Análise e Proposição

A terceira e última etapa é a Análise e Proposição, onde os dados obtidos na revisão da literatura e dos dados secundários serão analisados e comparados. A partir dessa análise, será desenvolvido um quadro de recomendações para as PMES com foco em aplicações de conectividade com máquinas legadas para melhoria da gestão da produção.

Além disso, com os resultados da análise propor uma solução IIoT para atender as especificidades das PMEs, utilizando uma metodologia de projeto chamada PoC Design, que pode ser usada para apoiar o desenvolvimento do conceito e garantir o valor comercial das iniciativas de IoT (PRASANNA et al., 2021).

Segundo Prasanna et al. (2021), PoC Design é uma metodologia para desenvolver e validar o conceito de uma iniciativa de IoT. Envolve a criação de um protótipo ou de uma versão em pequena escala do projeto de IoT para demonstrar sua viabilidade e potencial valor comercial. A Figura 4, destaca as quatro etapas da metodologia PoC Design, são elas: concepção, construir, avaliar e aprender.

Figura 4 – Etapas do PoC Design



Fonte: Adaptada de PRASANNA et al. (2021).

Na etapa Concepção a arquitetura do sistema, passa da forma abstrata para um projeto, onde a camada é especificada com base em dados técnicas. A topologia da rede é definida para mostrar a comunicação entre a rede e as demais camadas, além disso, a escolha dos sensores e dos protocolos de comunicação são definidos nesta etapa.

Com o projeto estabelecido, segue-se para etapa Construir, onde a PoC é construída de maneira rápida, fácil e econômica. A construção deve priorizar componentes existentes para evitar altos custos de desenvolvimento. A PoC pode incluir software, hardware ou ambos, mas não deve ser um produto finalizado, apenas uma previsão do conceito. O objetivo é verificar a viabilidade do conceito sem investir em desenvolvimento excessivo.

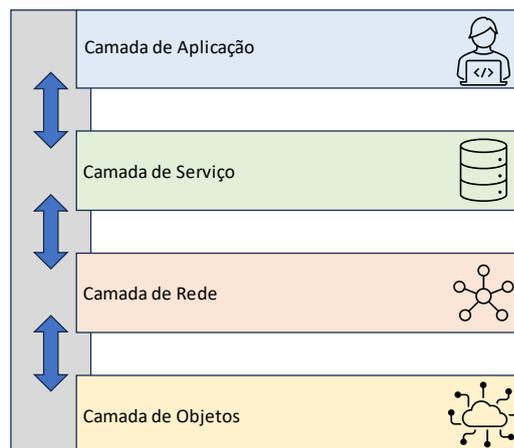
A etapa de Avaliação consiste em analisar a PoC e coletar feedback sobre a definição do problema e os objetivos. A avaliação, deve verificar se a PoC abordou o problema corretamente e atingiu os objetivos. É essencial conduzir essa avaliação em conjunto com as partes interessadas para garantir que o desenvolvimento esteja alinhado.

Após a avaliação, as lições aprendidas são analisadas na etapa Aprender. Se a PoC não for considerada adequada para as partes interessadas, as informações obtidas guiarão uma nova versão. Se estiver pronta, o conceito será escalado para um produto final. Essas lições também são aplicadas em projetos futuros, identificando novas oportunidades e aplicando os conceitos em diferentes áreas.

O requisito fundamental da IoT é que os elementos da rede precisam estar conectados entre si. A estrutura de um sistema de IoT deve assegurar o funcionamento dos elementos, estabelecendo uma ligação entre os dispositivos físicos e o mundo virtual da IoT.

A arquitetura proposta para o desenvolvimento de sistemas de IoT orientados a serviços (SOA), que consiste em quatro camadas, foi utilizada por Prasanna et al. (2021) e Sosa-Reyna, Tello-Leal e Lara-Alabazares (2018), e foi aplicada neste estudo. A Figura 5 ilustra as 4 camadas adaptadas para IoT.

Figura 5 – Arquitetura baseada em SOA para sistemas IoT



Fonte: Adaptado de SOSA-REYNA; TELLO-LEAL; LARA-ALABAZARES (2018).

A camada de objeto é composta pelos hardwares que detectam as variáveis, uma identidade para cada objeto permite rastreabilidade. A camada de rede é composta pela infraestrutura para conectar os dispositivos sem fio, cabeados ou móveis, permitindo compartilhar os dados coletados. Na camada de serviços são criados e gerenciados serviços exigidos pelos usuários ou aplicativos de software. E finalmente, na camada de aplicação tem o papel de fornecer serviços ou aplicativos que integram ou analisam as informações recebidas das camadas anteriores (SOSA-REYNA; TELLO-LEAL; LARA-ALABAZARES, 2018).

4 RESULTADOS

Nesta seção será apresentado os resultados de cada etapa da metodologia aplicada neste estudo, que compreende três etapas interconectadas e sequenciais: a revisão sistemática da literatura; em seguida, análise de dados secundários; por fim, procede-se à análise e proposição de um IIoT. Além disso, são discutidas as premissas e delimitações de um projeto IIoT, bem como, possíveis aplicações futuras da IIoT em ambientes produtivos. Estas etapas serão abordadas e explicadas em detalhe nas próximas seções.

4.1 Revisão Sistemática da Literatura

Para esta pesquisa, foi utilizada a plataforma Scopus, uma das maiores bases de dados de resumos e citações de literatura científica revisada por pares, lançada pela Elsevier em 2004. A plataforma indexa milhões de artigos de periódicos, livros e anais de conferências, abrangendo mais de 29.200 títulos de mais de 7.000 editores internacionais (ELSEVIER, 2024).

Inicialmente como critério de pesquisa foi utilizada a palavra-chave: “*Industry 4.0*”, nos parâmetros *Article title*, *Abstract*, *Keywords*, limitados ao período de 2013 a 2023, realizada no dia 07 de setembro de 2023, retornando 29.592 documentos. Devido a grande quantidade encontrada com a pesquisa foi adicionada mais uma palavra-chave: “*sme*”, reduzindo para 501 documentos relacionados. Para ser mais assertivo quanto ao objetivo da pesquisa, acrescentou-se mais duas palavras-chaves: “*lean*” e “*production management*” e utilizando-se de operadores booleanos: *AND* e *OR*, foi possível utilizar a seguinte estratégia de busca: (*TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0") AND TITLE-ABS-KEY ("sme") OR TITLE-ABS-KEY ("lean") OR TITLE-ABS-KEY ("production management")*), observar que só foram utilizadas palavras em língua inglesa, assim retornaram um total de 1540 documentos que correspondem aos critérios de busca, a Tabela 1 demonstra essa evolução.

Tabela 1 – Documentos encontrados na Plataforma Scopus

Palavra-chave/lógica de busca	Total de documentos
<i>Industry 4.0</i>	29592
<i>Industry 4.0 AND sme</i>	501
<i>Industry 4.0 AND sme OR lean</i>	1386
<i>Industry 4.0 AND sme OR lean OR production management</i>	1540
Documentos correspondentes aos critérios de busca	1540

Fonte: Próprio autor (2023).

Estes documentos estão distribuídos em oito categorias e podem ser observados na Tabela 2, onde a maior ocorrência são artigos de conferência e artigos em periódicos, com 673 e 612 documentos, respectivamente.

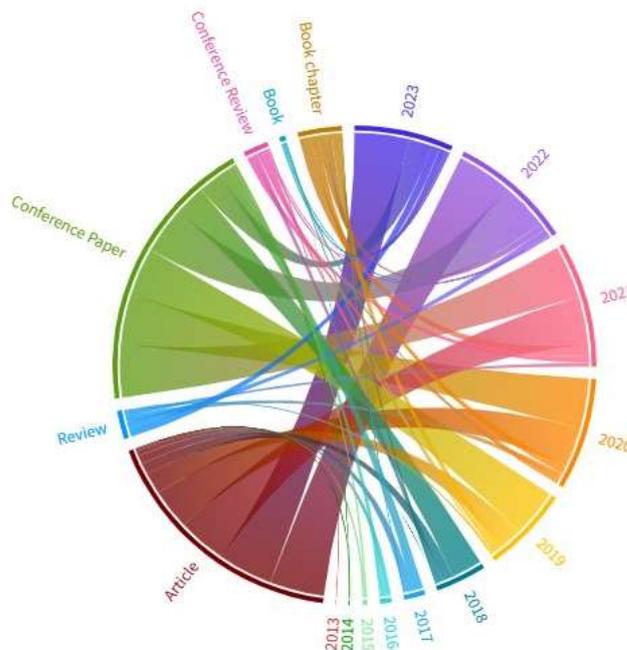
Tabela 2 – Tipo de documentos versus quantidade

Tipo do Documento	Total de documentos
<i>Conference Paper</i>	673
<i>Article</i>	612
<i>Book Chapter</i>	106
<i>Review</i>	69
<i>Conference Review</i>	61
<i>Book</i>	15
<i>Editorial</i>	2
<i>Note</i>	2
<i>Total</i>	1540

Fonte: Próprio autor (2023).

Na Figura 6, é possível observar visualmente a relação entre os tipos de documentos, o ano de publicação e suas respectivas quantidades, representadas pelo tamanho de seus arcos.

Figura 6 – Relação entre tipos de documentos e ano de publicação

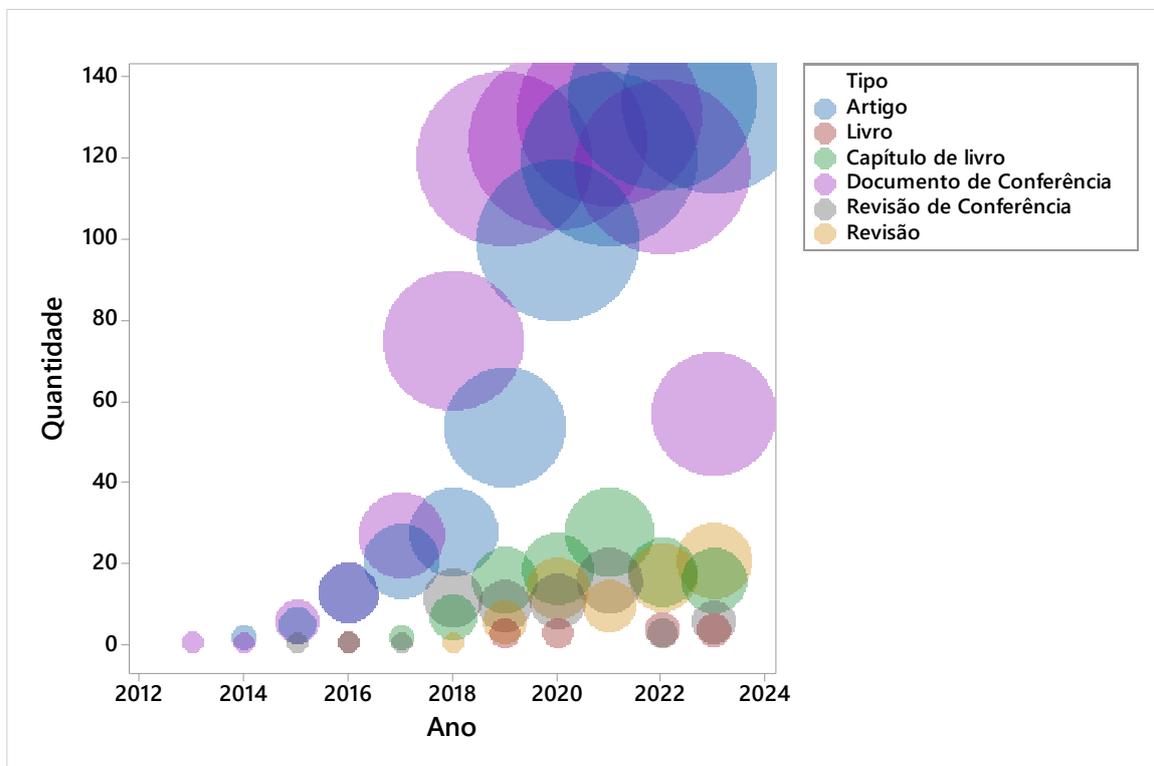


Fonte: Próprio autor (2023).

Pode-se verificar que o número de publicações começou a crescer a partir de 2013 e a partir do ano 2019 até 2023 ocorreu uma estabilização das publicações. Portanto, para essa dissertação utilizou-se os últimos 5 anos de pesquisa, descartando os anos de 2013 a 2018, ressaltado que algumas publicações de 2023, por serem recentes, não estavam acessíveis no momento da pesquisa, nesta análise foram retirados 219 documentos dos 1540 documentos totais, mais detalhes podem ser vistos na próxima subseção 4.1.1 Método PRISMA.

A Figura 7 demonstra a evolução da quantidade de publicações em relação ao tipo de documento e seu ano de publicação sobre o tema de pesquisa.

Figura 7 – Evolução das publicações por tipo de documento de 2013 a 2023



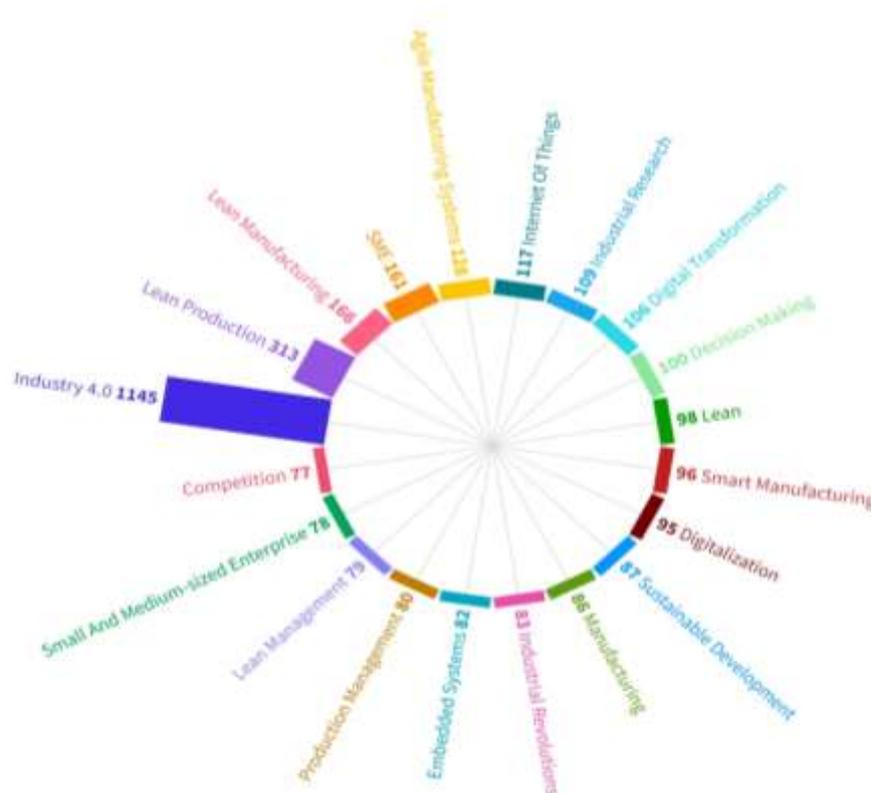
Fonte: Próprio autor (2023).

Pode-se observar pela Figura 7 que a maior a quantidade de publicações acontece a partir de 2019, comparando com o ano de 2018 houve uma aumento de 5,6%, com a maior concentração de artigos de periódicos 39,74% e artigos de conferência 43,7%, além disso a menor concentração de publicações são as revisões que ocupam apenas 4,48% do total de publicações. Para desenvolvimento desta dissertação foi considerado apenas os artigos de periódicos e revisões, descartando as demais categorias de documentos.

palavras-chave coocorrem. As conexões mostram a inter-relação entre dois itens, e o tamanho do nó reflete a força/relevância daquele termo específico.

Nos resultados desta análise, um total de 65 palavras-chave são consideradas importantes entre as 6.682 palavras-chave. Além disso, é impossível analisar as 65 palavras-chave em um único estudo. Portanto, algumas palavras-chave importantes foram selecionadas a partir dessas palavras-chave, como: *Industry 4.0*, *Lean Production*, *Lean Manufacturing*, *SME*, *Agile Manufacturing Systems*, *Internet Of Things* etc. O máximo de palavras-chave foi selecionado com base na ocorrência e na força do link da palavra-chave usada na literatura. Por exemplo, a palavras-chave *Industry 4.0* tem 1147 ocorrências com a força de 3573. Apenas a maior força das palavras-chave é discutida no presente estudo. Através da Figura 9 visualizamos as 20 mais citadas.

Figura 9 – Palavras-chave mais citadas

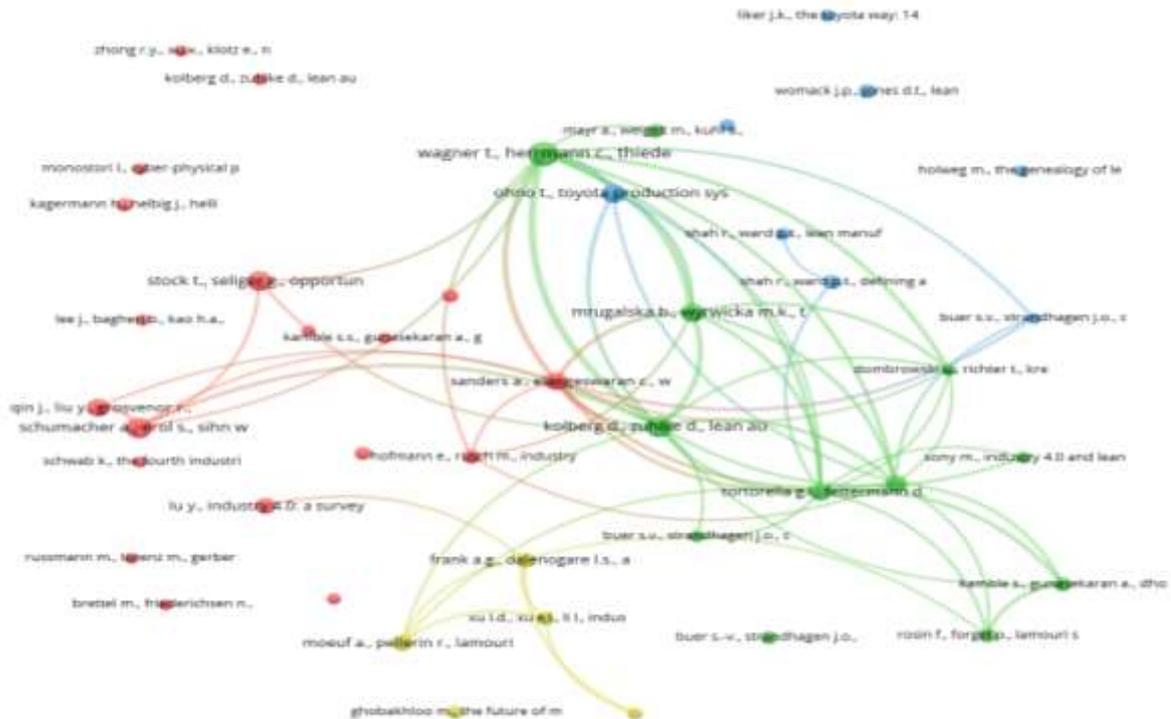


Fonte: Próprio autor (2023).

Além disso, observou-se que o máximo de citações está relacionado aos estudos baseados na I4.0, um mapa de cocitação foi utilizado para medir a frequência com que o artigo foi citado nos documentos selecionados. A visualização do mapa classificou os dados em 4

clusters, 44 itens de coocorrência, com 781 links e 3.429 nós de força. A cocitação na visualização da rede é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Mapa de cocitações



Fonte: Próprio autor (2023).

A força de cada nó representa o número de citações publicadas. Esta análise é limitada a pelo menos 20 citações e uma força mínima de 10. Portanto a publicação: Sanders A.; Elangeswaran C.; Wulfsberg J. com o título: *Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing*, obteve 42 links com uma força de 302.

4.1.1 Método PRISMA

Primeiro, na etapa de estudos prévios, foram selecionados de maneira intencional na fase de identificação: 15 artigos de periódicos, 10 revisões, 5 livros, 2 dissertações e 13 artigos de conferência, totalizando 45 documentos inclusos nessa etapa, através das palavras-chave já mencionadas, para uma leitura inicial do tema. As fontes primárias foram artigos científicos publicados em periódicos diversos. A busca foi feita na plataforma Scopus, com o objetivo de identificar pesquisas que apontem os benefícios e barreiras para adoção da I4.0 por PMEs.

Em seguida, na etapa de identificação de novos estudos por meio de bases de dados e repositórios, fase identificação, os 1540 documentos selecionados através da estratégia de busca já mencionada, foram selecionados através de critérios de inclusão ou exclusão. Foram utilizados os seguintes critérios de inclusão: (I) Artigos e revisões completas em inglês, (II) Período de 2019 a 2023, (III) Artigos que envolvam I4.0 e PMEs, (IV) Artigos que apresentam alguma relação entre PMEs e *lean* ou gestão da produção, (V) Artigos acessíveis integralmente.

Dessa forma, para alcançar a fase de triagem, foram extraídos 219 documentos de um total de 1540, aplicando-se o filtro de ano de publicação anterior a 2019. Em seguida, consideraram-se apenas artigos de periódicos e revisões, resultando na eliminação de 710 documentos inelegíveis. Por fim, foram desconsiderados 21 documentos que não estavam em língua inglesa, restando, assim, 590 documentos para a triagem.

Na fase triagem, foram excluídos os estudos que não atendiam aos critérios de inclusão estabelecidos. Assim, foram excluídos 21 documentos *in press* e 238 documentos classificados como *non-open access*. Assim mantiveram-se 331 documentos para uma análise mais profunda dos títulos, resumos e palavras-chaves.

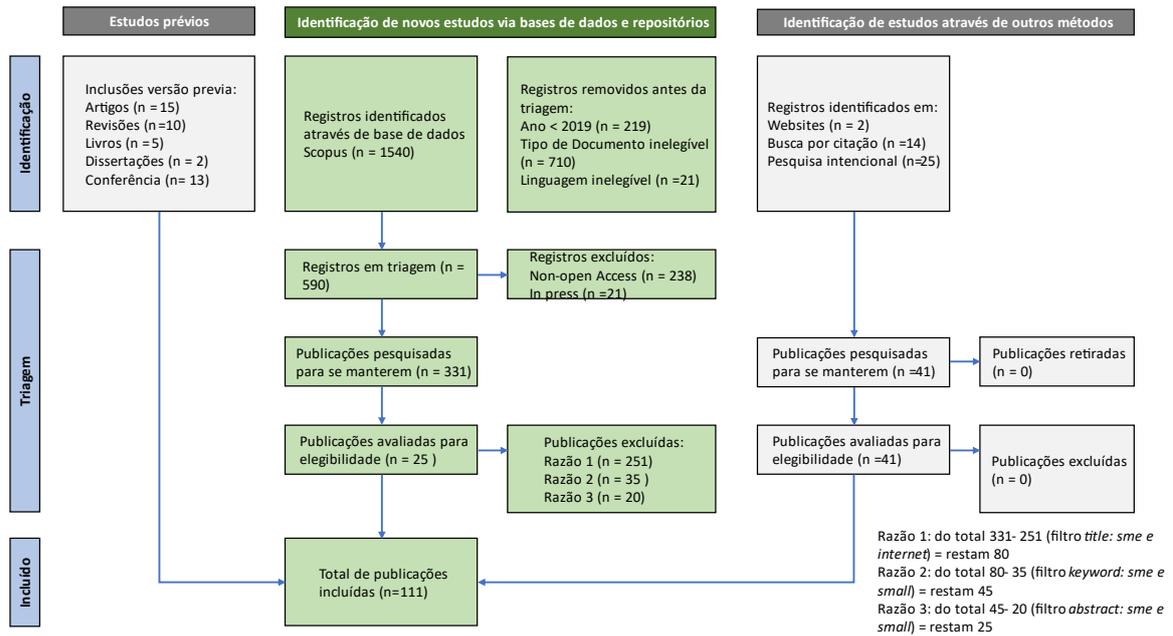
Dos 331 documentos restantes foi aplicada uma série de filtros, que culminou nas 3 razões para exclusão. A primeira razão de exclusão consistiu na aplicação do filtro *title = sme* e *internet*, removendo 251 documentos dos 331 originais, deixando 80 documentos restantes. A segunda razão de exclusão, baseada no filtro *keyword = sme* e *small*, eliminou mais 35 documentos dos 80 remanescentes, resultando em 45. Por fim, a terceira razão de exclusão envolveu o filtro *abstract = small*, retirando mais 20 documentos dos 45, restando um total de 25 documentos, que foram inclusos nesta etapa.

Posteriormente, na etapa de identificação de novos estudos por outros métodos, foram identificados 2 websites, 14 documentos através de citações e 25 documentos por pesquisa intencional, totalizando esta etapa com mais 41 documentos.

Como resultado desta RSL, chegou-se ao número final de estudos incluídos: 45 documentos na etapa de estudos prévios, 25 documentos na etapa de identificação de novos estudos por meio de bases de dados e repositórios, e 41 documentos provenientes de estudos anteriores, totalizando 111 documentos.

A Figura 11 demonstra as etapas e evolução do método PRISMA 2020 para este estudo, bem como as razões para inclusão e exclusão dos documentos.

Figura 11 – Resultados PRISMA 2020



Fonte: Próprio autor (2023).

Em seguida, procedeu-se à leitura completa de todos os estudos previamente selecionados na etapa de identificação de novos estudos por meio de bases de dados e repositórios, onde foram identificados os benefícios e as barreiras.

O Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais benefícios e barreiras da adoção da I4.0 por PMEs, com base na RSL realizada na plataforma Scopus.

Quadro 1 – Síntese dos benefícios e barreiras da adoção da I4.0 por PMEs

Autores/Ano	Benefícios	Barreiras
Amaral e Peças (2021)	A I4.0 proporciona flexibilidade, robustez e padrões de alta qualidade em toda a cadeia, incluindo engenharia, planejamento, fabricação, operação e logística. Sua integração em todos os níveis da organização resulta em maior eficiência e produtividade.	PMEs enfrentam desafios na implementação da I4.0 devido a recursos limitados, falta de experiência e dificuldades na adoção de novas tecnologias. A baixa maturidade inicial das PMEs torna difícil avaliar sua prontidão para a I4.0, já que os modelos de maturidade existentes não são adequados para empresas com esse perfil.

<p>Bouchar, Gamache e Abdulnour (2023)</p>	<p>A adoção da I4.0 proporciona maior competitividade no mercado, permitindo a personalização de produtos para atender às demandas dos clientes. Também aumenta a agilidade e adaptabilidade para responder às mudanças no mercado, melhorando a eficiência com tecnologias como automação e análise de dados. O acesso a dados em tempo real suporta a tomada de decisões baseadas em dados, enquanto a colaboração promove parcerias ágeis. Isso também impulsiona a inovação e a capacidade de oferecer produtos personalizados, gerando satisfação do cliente e vantagem competitiva em um mercado globalizado.</p>	<p>A revisão destaca a falta de priorização de fatores essenciais para a bem-sucedida implementação da customização em massa em PMEs, bem como a falta de detalhes sobre as ferramentas e seus níveis de maturidade resultantes desses fatores. Além disso, há incerteza em relação à ordem de implementação das tecnologias, sem um entendimento de sua extensão. Consequentemente, há uma chamada por mais pesquisas para avaliar a importância e interconexões dos fatores para uma implementação bem-sucedida. As fontes revisadas não fornecem informações sobre possíveis consequências negativas da adoção de tecnologias da I4.0 nas PMEs.</p>
<p>Brodeur, Pellerin e Deschamps (2022)</p>	<p>A digitalização na manufatura permite a tomada de decisão descentralizada com dados em tempo real, aprimorando processos, produtos e serviços. A integração de vários grupos tecnológicos melhora o desempenho e a colaboração nas empresas de manufatura, resultando em transformações radicais de desempenho e na criação de novo valor.</p>	<p>As PMEs de manufatura não têm a maturidade de gerenciamento organizacional das grandes empresas, impactando seu processo de transformação digital. Elas enfrentam desafios na implementação da I4.0 devido ao seu foco e flexibilidade de curto prazo, que exigem que elas estabeleçam objetivos pequenos e alcançáveis e ajustem estratégias com base em novas oportunidades e desafios, assim preferem pequenos projetos de implementação de tecnologia para minimizar a interrupção organizacional durante a transformação digital.</p>
<p>Chavez, Hauge e Bellgran (2022)</p>	<p>A I4.0 permite o monitoramento de dados em tempo real para processos, aprimorando a tomada de decisões com base em funções internas, redes e dados do cliente. Ele revoluciona a manufatura ao maximizar a produção e minimizar a utilização de recursos, levando ao aumento da eficiência. Por meio de avanços tecnológicos, como robôs autônomos, simulação e análise de <i>big data</i>, a I4.0 facilita a tomada de decisões autônomas e a manutenção preditiva.</p>	<p>As PMEs enfrentam desafios na adaptação à transformação digital devido à falta de consciência dos benefícios da I4.0, dificultando as aplicações práticas. A escassez de habilidades e a resistência à mudança representam obstáculos contínuos para as PME adotarem novas tecnologias e ideias. A necessidade de uma transição gradual e expansão dos elementos digitais é primordial para as PME com capacidades de investimento limitadas.</p>
<p>Cimini et al. (2020)</p>	<p>A integração da I4.0 nas operações de manufatura impulsiona a eficiência e produtividade, permitindo processos de alto desempenho e a adoção de novos modelos de negócios digitais, isso pode melhorar a competitividade.</p>	<p>A adoção da I4.0 traz desafios operacionais, organizacionais e gerenciais, exigindo uma abordagem abrangente para a transformação digital. Além dos desafios tecnológicos, questões sociais e políticas também são importantes para uma implementação bem-sucedida.</p>

<p>Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022)</p>	<p>A automação e digitalização melhoram a eficiência e produtividade, aumenta a competitividade ao utilizar tecnologias avançadas como IoT e IA para otimizar a produção e melhorar a qualidade, além de permitir a personalização. A adoção de novos modelos de negócios, baseados em dados, diversifica as ofertas e aumenta a lucratividade. A análise de dados em tempo real e a análise preditiva capacitam as PMEs a tomar decisões estratégicas e responder rapidamente às mudanças do mercado.</p>	<p>Os desafios incluem altos custos iniciais para aquisição de tecnologias avançadas, limitando recursos financeiros das PMEs. Também há a necessidade de habilidades especializadas na força de trabalho para usar e gerenciar eficazmente essas tecnologias. Além disso, preocupações com segurança cibernética e privacidade de dados surgem devido à maior conectividade e dependência de sistemas digitais, expondo as PMEs a ameaças e violações.</p>
<p>Grooss, Presser, Tambo (2022)</p>	<p>A I4.0 permite novas formas de conectar dispositivos e sistemas, gerando valiosas percepções sobre dados e produtos personalizáveis. Facilita a autonomia tecnológica e os avanços nos processos industriais, aumentando a eficiência e a produtividade.</p>	<p>As PMEs enfrentam restrições financeiras que dificultam as iniciativas da I4.0, exigindo investimentos significativos. O apoio cultural limitado é uma barreira, exigindo uma mudança em direção a uma cultura que abrace a mudança por meio da comunicação, envolvimento dos funcionários e compartilhamento de ideias.</p>
<p>Hung e Chen (2023)</p>	<p>Verifica-se que a disponibilidade de recursos tecnológicos tem uma relação significativa com a adoção da I4.0, sugerindo que a adoção dessas tecnologias pode impactar as operações e o desempenho das PMEs.</p>	<p>Os custos de investimento desempenham um papel na sustentabilidade, já que as PMEs podem ter que investir em tecnologias e práticas sustentáveis. No entanto, o estudo destaca uma lacuna significativa nas PMEs em alcançar a sustentabilidade por meio da I4.0, sugerindo que a adoção dessa tecnologia não garante automaticamente o sucesso da sustentabilidade para todas as PMEs.</p>
<p>Ingaldi e Ulewicz (2019)</p>	<p>A automação e integração de processos aumentam a eficiência e produtividade, permitindo maior flexibilidade na resposta ao mercado. A coleta e análise de dados em tempo real facilitam a tomada de decisões, enquanto a gestão da cadeia de suprimentos é otimizada com melhor visibilidade e coordenação. Isso resulta em redução de custos de produção e desperdício, graças à manutenção preditiva e alocação otimizada de recursos.</p>	<p>Altos custos de investimento inicial para implementação de novas tecnologias e infraestrutura. Necessidade de habilidades e treinamento especializados para operar e manter sistemas avançados. Possíveis riscos de cibersegurança e preocupações com a privacidade de dados. Interrupção dos fluxos de trabalho existentes e resistência dos funcionários à mudança.</p>
<p>Jung e Shin (2023)</p>	<p>O estudo revelou que o desempenho dos sistemas de produção existentes é um fator significativo para aumentar os benefícios esperados dos sistemas de produção inteligentes, incentivando as empresas a adotarem fábricas inteligentes. Além disso, o apoio da alta gerência desempenha um papel importante no desempenho ideal dos sistemas de produção, enquanto a coordenação e integração do conhecimento não têm um impacto direto nos benefícios dos sistemas de produção inteligentes.</p>	<p>O estudo não encontrou um impacto significativo do suporte da alta gerência aos sistemas de informação nos benefícios esperados dos sistemas de produção inteligentes, sugerindo que esse fator pode não ser tão influente na adoção. Diferentes visões sobre os benefícios das novas tecnologias e seu impacto no trabalho têm dificultado a adoção de fábricas inteligentes, com alguns funcionários demonstrando reservas sobre a utilidade dessas tecnologias.</p>

Konstantinidis et al. (2022)	A I4.0 melhora a qualidade e a eficiência da produção por meio de ambientes controlados e produção sem falhas. A digitalização de instalações e infraestruturas integradas oferece maior flexibilidade e valiosas oportunidades para a transição digital. Além disso, os sistemas de manufatura reconfiguráveis aprimoram a capacidade das fábricas de responder a mercados flutuantes, permitindo uma concorrência econômica em ambientes dinâmicos.	As PMEs enfrentam desafios para compreender totalmente o valor da transformação digital, levando a investimentos sem uma consciência clara dos benefícios. Os ativos de produção industrial existentes podem não suportar totalmente novas oportunidades de programação e controle de produção, dificultando a adoção de tecnologias da I4.0.
Masood e Sonntag (2020)	A automação e a análise de dados em tempo real proporcionam um aumento significativo na eficiência, produtividade e controle de qualidade, permitindo melhor adaptação às demandas do mercado e requisitos dos clientes. Isso resulta em processos de produção otimizados, economia de custos e uso eficaz de recursos, proporcionando uma vantagem competitiva. Além disso, a manutenção preditiva é facilitada, reduzindo o tempo de inatividade e melhorando o desempenho geral dos equipamentos.	Restrições financeiras podem ser um desafio para as PMEs na implementação de tecnologias da I4.0. Restrições de conhecimento e falta de experiência anterior com a I4.0 podem dificultar a adoção.
Melo et al. (2023)	Permite acesso a dados em tempo real para melhor tomada de decisão e otimização de processos, melhorando a experiência do cliente com produtos personalizados. Proporciona flexibilidade e agilidade na resposta ao mercado e abre oportunidades de inovação e novos modelos de negócios. Além disso, facilita colaborações com grandes empresas e fornecedores de tecnologia para acesso a recursos e conhecimentos especializados.	Os desafios incluem altos custos iniciais para adoção de tecnologia e atualização de infraestrutura, a necessidade de qualificar e requalificar a força de trabalho, preocupações com segurança cibernética e riscos relacionados à privacidade de dados. Além disso, existe o risco de deslocamento de empregos devido à automação, complexidade na integração de sistemas, dependência da tecnologia e possíveis interrupções devido a falhas técnicas.
Michna e Kmiecik (2020)	Melhora o desempenho sustentável dos negócios por meio de elementos como <i>big data</i> e IoT, além disso, o estudo revela uma conexão positiva entre desempenho financeiro e disposição para adotar a I4.0, independentemente do tamanho da empresa.	Recursos limitados são um grande desafio para as PMEs na implementação da I4.0, que requer investimentos significativos. PMEs com desempenho financeiro fraco e acesso limitado a financiamento externo podem ficar presas em um ciclo de baixo desempenho e inovação limitada ao tentar adotar soluções da I4.0.
Prause (2019)	Eficiência e produtividade melhoradas com redes de sensores, análise de dados em tempo real, integração de sistemas de produção. Melhorias na tomada de decisão com dados em tempo real. Potencial de redução de custos e otimização de recursos por meio da automação e digitalização.	A incerteza de mercado apresenta desafios a curto, médio e longo prazo. PMEs podem enfrentar obstáculos devido à complexidade da produção, falta de padrões tecnológicos e satisfação com sistemas existentes. É debatido o impacto das estruturas organizacionais na adoção de tecnologia.

<p>Queiroz, Alves Junior e Melo (2022)</p>	<p>A implementação da I4.0 beneficia as PMEs de várias maneiras: melhora o desempenho, pois permite a análise em tempo real e aprimora as decisões de fabricação, aumenta a eficiência e reduz o desperdício, alinhando-se à manufatura enxuta, e oferece estratégias personalizadas para atender às necessidades específicas das PMEs.</p>	<p>PMEs enfrentam desafios devido a recursos e finanças limitados, o que dificulta a adoção das tecnologias da I4.0. Além disso, a complexidade da implementação, envolvendo mudanças tecnológicas e organizacionais, pode ser desafiadora e requer muitos recursos.</p>
<p>Rahamaddulla et al. (2021)</p>	<p>Facilita a personalização em massa e o planejamento de produtos de baixo custo. Permite o controle preciso do processo de fabricação e da manutenção baseada nas condições. Melhora o monitoramento do desempenho no pós-compra, como manutenção e assistência técnica.</p>	<p>O artigo reconhece a falta de um modelo padrão e amplamente aceito para avaliação de prontidão e maturidade na área de manufatura inteligente. Muitos modelos existentes são orientados para grandes empresas e podem não ser adequados para PMEs, como o modelo <i>Impuls-Industrie 4.0 Readiness</i>, que se concentra em critérios avançados de tecnologia de fabricação e é mais adequado para empresas maiores.</p>
<p>Rauch et al. (2020)</p>	<p>Aumenta a competitividade das PME, oferecendo novas oportunidades. Apresenta conceitos avançados como CPS, IoT e automação para melhorar a eficiência. Permite monitoramento em tempo real, manufatura ágil, computação em nuvem e análise de <i>big data</i> para uma melhor tomada de decisões.</p>	<p>O processo de avaliação pode ser demorado e requer especialistas de várias áreas, o que pode ser desafiador para PMEs. A subjetividade pode ocorrer se apenas uma pessoa conduzir a avaliação, ressaltando a importância de uma abordagem em equipe para maior objetividade.</p>
<p>Schönfuß et al. (2021)</p>	<p>A implementação de tecnologias digitais melhora a produtividade e eficiência, proporcionando acesso a dados em tempo real para decisões melhores. Isso permite uma alocação de recursos otimizada e redução de custos por meio da automação. A adoção aumenta a competitividade e as oportunidades de mercado, permitindo personalização e flexibilidade na produção para atender às demandas dos clientes.</p>	<p>As PMEs enfrentam restrições financeiras e recursos limitados para investir em tecnologias da I4.0. Há também falta de conhecimento e conscientização sobre essas tecnologias e desafios na integração com sistemas existentes. A automação pode levar a interrupções na força de trabalho e há complexidade na implementação e gerenciamento de tecnologias digitais.</p>
<p>Shqair e Altarazi (2022)</p>	<p>Os requisitos do cliente, a redução de custos, a prática dos concorrentes, a melhoria da produtividade e a melhoria da qualidade são identificados como os principais fatores de influência para a implementação da I4.0 na Jordânia.</p>	<p>Falta de consciência e conhecimento sobre a importância da I4.0, muitas empresas, incluindo PMEs, não ouviram falar da I4.0 ou não têm o conhecimento relacionado à introdução desse novo conceito e como estar em conformidade com ele.</p>
<p>Tick, Saáry e Kárpáti-Daróczy (2022)</p>	<p>Os resultados da pesquisa indicam que as PMEs podem alcançar um estado de digitalização equilibrada. Existem três grupos: as PMEs inspiradas e preocupadas acreditam nos benefícios da digitalização, mas também têm preocupações; os conservadores indiferentes são mais céticos em relação à digitalização; e os céticos são os menos entusiastas e mais preocupados com os impactos negativos da digitalização.</p>	<p>Algumas PMEs não incorporaram os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em suas estratégias de longo prazo, indicando falta de consideração pela sustentabilidade. Além disso, muitas PMEs concordam que a digitalização pode contribuir para o lixo eletrônico, a exaustão de recursos naturais e emissões excessivas. Em geral, são necessárias mais pesquisas e estratégias para promover uma abordagem equilibrada da digitalização entre as PMEs.</p>

Türkeş et al. (2019)	Maior flexibilidade e agilidade nos sistemas de produção. Redução de custos e falhas, otimizando a operação dos empreendimentos. Integração de tecnologias nas linhas de produção, resultando em maior eficiência e produtividade. Conectividade e comunicação aprimoradas entre máquinas, permitindo a troca e análise de dados em tempo real para uma melhor tomada de decisão.	Falta de conhecimento sobre a I4.0, o que pode dificultar sua implementação efetiva. Falta de compreensão da importância estratégica da I4.0, particularmente nas indústrias automotiva e química. Exigência de educação continuada dos funcionários para acompanhar a evolução da tecnologia. Falta de padrões, o que pode representar desafios na adoção e integração das tecnologias da I4.0.
Voza, Szewieczek e Grabara (2022)	A digitalização de empresas tem um impacto positivo na redução das emissões de carbono, com implicações práticas significativas para o desenvolvimento sustentável no setor de PME, destacando a importância de abordar as emissões de carbono como uma questão fundamental.	A pesquisa identificou uma diferença estatisticamente significativa entre a Polônia e a Sérvia em relação à redução de emissões prejudiciais por meio da digitalização. No entanto, não mencionou explicitamente outras desvantagens ou impactos negativos da digitalização nas PMEs.
Wong e Kee (2022)	A adoção da I4.0 resulta em maior eficiência e competitividade na produção, possibilita a exploração criativa de tecnologias emergentes, oferece acesso a novos mercados e oportunidades, melhora a compreensão das necessidades dos clientes e a satisfação deles, além de potencializar a lucratividade e o crescimento.	Necessidade de qualificação e requalificação dos funcionários. Possível deslocamento de empregos devido à automação. Riscos de segurança cibernética e questões de privacidade de dados são os destaques deste artigo.
Yu e Schweisfurth (2020)	A automação e otimização de processos aumentam a eficiência e produtividade, tornando as PMEs mais competitivas. Acesso a dados em tempo real facilita a tomada de decisão e manutenção preditiva, resultando em economia de custos e melhor uso de recursos. A integração de CPS e IoT melhora a comunicação entre máquinas e permite maior personalização de produtos para atender às preferências dos clientes.	Os altos custos iniciais incluem aquisição de tecnologia e treinamento. Mudanças nos processos podem levar à resistência dos funcionários. A cibersegurança também é um desafio que requer investimentos em medidas robustas.

Fonte: Próprio autor (2023).

O Quadro 1 apresentado relaciona os benefícios e barreiras na adoção da I4.0 por PMEs na perspectiva da gestão da produção. Os autores dos artigos revisados concordam que a I4.0 oferece uma série de benefícios potenciais para as PMEs.

Os benefícios da implementação da I4.0 incluem: aumento de eficiência e produtividade, melhoria de qualidade e tomada de decisão, redução de custos, personalização de produtos e novos modelos de negócios, o que pode levar a uma melhor adaptação às

demandas do mercado e aos requisitos do cliente. O Quadro 2 apresenta os benefícios e seus autores.

Quadro 2 – Benefícios da adoção da I4.0 por PMEs

Benefícios	Autores
Aumento da eficiência e produtividade	Amaral e Peças (2021) Cimini et al. (2020) Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022) Ingaldi e Ulewicz (2019) Prause (2019) Queiroz, Alves Junior e Melo (2022) Schönfuß et al. (2021) Wong e Kee (2022) Yu e Schweisfurth (2020)
Criação de novos modelos de negócios	Cimini et al. (2020) Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022) Melo et al. (2023)
Melhoria da qualidade	Amaral e Peças (2021) Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022) Masood e Sonntag (2020) Shqair e Altarazi (2022)
Melhoria da tomada de decisão	Bouchard, Gamache e Abdalnour (2023) Ingaldi e Ulewicz (2019) Konstantinidis et al. (2022) Melo et al. (2023) Prause (2019) Türkeş et al. (2019) Yu e Schweisfurth (2020)
Otimização da cadeia de suprimentos	Amaral e Peças (2021) Grooss, Presser e Tambo (2022) Ingaldi e Ulewicz (2019)
Personalização de produtos e serviços	Bouchard, Gamache e Abdalnour (2023) Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022) Melo et al. (2023) Queiroz, Alves Junior e Melo (2022) Schönfuß et al. (2021) Yu e Schweisfurth (2020)
Redução de custos	Shqair e Altarazi (2022) Ingaldi e Ulewicz (2019) Masood e Sonntag (2020) Prause (2019) Schönfuß et al. (2021) Türkeş et al. (2019) Yu e Schweisfurth (2020)

Fonte: Próprio autor (2023).

Esses fatores evidenciam o impacto positivo que a I4.0 pode trazer para a gestão e operação das PMEs, abordando aspectos essenciais que podem impulsionar a competitividade e a eficiência dessas empresas. A seguir, cada um dos benefícios é descrito:

- Aumento da eficiência e produtividade: A implementação da I4.0 possibilita a automação de tarefas e processos, o que resulta em maior eficiência e produtividade. Por exemplo, a automação de máquinas e equipamentos pode reduzir significativamente o tempo de produção e o desperdício de materiais.
- Criação de novos modelos de negócios: A transformação digital, impulsionada pela I4.0, oferece às PMEs oportunidades para desenvolver novos modelos de negócios, baseados em dados e inovação. Tecnologias como *big data* podem ser exploradas para criar produtos e serviços personalizados ou até mesmo oferecer novos serviços digitais.
- Melhoria da qualidade: A aplicação de sensores e inteligência artificial permite que as PMEs aprimorem a qualidade de seus produtos e serviços. Essas tecnologias ajudam a identificar e corrigir defeitos de fabricação de forma rápida e precisa.
- Melhoria da tomada de decisão: Com o suporte de dados em tempo real, as PMEs podem tomar decisões mais fundamentadas e seguras. A análise de dados, por exemplo, facilita a identificação de tendências de mercado e oportunidades de melhoria operacional.
- Otimização da cadeia de suprimentos: A integração de sistemas de informação possibilitada pela I4.0 permite uma gestão mais eficiente da cadeia de suprimentos. Isso contribui para a redução de custos e o aumento da eficiência, como no rastreamento do movimento de produtos e materiais.
- Personalização de produtos e serviços: A utilização de tecnologias avançadas, como impressão 3D, abre novas possibilidades para personalizar produtos e serviços, atendendo às necessidades específicas dos clientes. Isso permite que as PMEs ofereçam produtos personalizados, mesmo em pequenas quantidades.
- Redução de custos: A I4.0 facilita a redução de custos operacionais e de produção. Um exemplo disso é a otimização da cadeia de suprimentos, que ajuda a minimizar desperdícios e reduzir o tempo de entrega.

No entanto, também existem barreiras na implementação da I4.0 por PMEs, que estão relacionados a custos e recursos financeiros, gestão do conhecimento, mudanças de hábitos nos processos, riscos cibernéticos e interrupções no processo produtivo. As barreiras com seus autores são mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 – Barreiras da adoção da I4.0 por PMEs

Barreiras	Autores (ano)
Custos iniciais elevados	Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022) Hung e Chen (2023) Ingaldi e Ulewicz (2019) Melo et al. (2023) Yu e Schweisfurth (2020)
Falta de conhecimento e habilidades	Masood e Sonntag (2020) Melo et al. (2023) Schönfuß et al. (2021) Shqair e Altarazi (2022) Türkeş et al. (2019)
Falta de recursos financeiros	Amaral e Peças (2021) Endrődi-Kovács e Stukovszky (2022) Queiroz, Alves Junior e Melo (2022) Schönfuß et al. (2021)
Interrupções na produção	Ingaldi e Ulewicz (2019) Melo et al. (2023) Schönfuß et al. (2021)
Mudanças nos processos de trabalho	Queiroz, Alves Junior e Melo (2022)
Riscos de segurança cibernética	Ingaldi e Ulewicz (2019) Melo et al. (2023) Wong e Kee (2022) Yu e Schweisfurth (2020)

Fonte: Próprio autor (2023).

Para facilitar a compreensão do Quadro 3, cada uma dessas barreiras é explicada em maior profundidade. Essas descrições detalham os principais obstáculos que devem ser gerenciados para que as PMEs possam aproveitar plenamente os benefícios das tecnologias da I4.0, sendo eles:

- Custos iniciais elevados: A implementação da I4.0 frequentemente demanda investimentos consideráveis em novas tecnologias, equipamentos e infraestrutura digital. Para PMEs, que muitas vezes operam com recursos financeiros limitados, esse custo inicial pode se tornar um obstáculo significativo para a adoção dessas inovações.
- Falta de conhecimento e habilidades: A adoção de tecnologias emergentes exige uma força de trabalho qualificada, com conhecimentos técnicos específicos. No entanto, muitas PMEs podem enfrentar dificuldades devido à carência de profissionais capacitados em áreas como IoT, automação e análise de dados, o que dificulta a implementação de soluções da I4.0.

- Falta de recursos financeiros: Além dos investimentos em infraestrutura, a transição para a I4.0 pode requerer recursos financeiros adicionais para atividades como treinamento de equipe, contratação de consultorias especializadas e manutenção de sistemas. Para PMEs com orçamentos restritos, esses custos podem dificultar a continuidade dos projetos.
- Interrupções na produção: A integração de tecnologias da I4.0 em ambientes produtivos pode causar interrupções temporárias nos processos de fabricação, seja durante a instalação de novos sistemas ou na fase de ajustes operacionais. As PMEs que operam com cronogramas rígidos e prazos de entrega curtos, essas interrupções podem resultar em prejuízos.
- Mudanças nos processos de trabalho: A incorporação de novas tecnologias pode exigir uma reestruturação dos processos de trabalho, o que muitas vezes gera resistência entre os colaboradores, principalmente aqueles que estão acostumados com práticas tradicionais. Gerenciar essa resistência e garantir uma transição suave pode ser um desafio para as PMEs.
- Riscos de segurança cibernética: Com o aumento da dependência de sistemas digitais e conectividade, a I4.0 expõe as empresas a novos riscos de segurança cibernética. A vulnerabilidade a ataques cibernéticos, como roubo de dados e interrupção de sistemas, é uma preocupação crescente, sobretudo para PMEs que podem não dispor de recursos suficientes para implementar medidas robustas de segurança.

Em síntese, a adoção da I4.0 pelas PMEs apresenta desafios consideráveis que vão desde a necessidade de investimentos iniciais elevados até a superação de barreiras relacionadas à capacitação da equipe, recursos financeiros limitados e interrupções nos processos produtivos. Além disso, a resistência às mudanças nos processos de trabalho e os riscos de segurança cibernética são fatores que demandam atenção estratégica. Apesar dessas dificuldades, gerenciar esses obstáculos de forma eficaz é fundamental para que as PMEs possam integrar as tecnologias da I4.0 e alcançar seus benefícios, como maior competitividade, eficiência e inovação contínua.

4.2 Análise dos Dados Secundários

A adoção de IoT na América Latina apresenta um cenário em transformação, com diferenças significativas entre o Brasil e a América Hispânica. O relatório IoT Snapshot 2024

(LOGICALIS, 2024) abrange dez dimensões principais, entre elas: o perfil econômico das empresas, a participação dos executivos, a distribuição setorial, e a evolução da adoção da tecnologia. Além disso, aborda-se a disparidade entre expectativas e realidade, os desafios enfrentados na implementação e a necessidade de capacitação profissional. O estudo também examina os padrões de investimento em 2023, o uso de plataformas específicas e as estratégias de segurança adotadas para lidar com os riscos da conectividade. Essa análise oferece uma visão abrangente dos avanços, obstáculos e tendências da IoT na região, fornecendo um panorama útil para diferentes atores do ecossistema digital.

A análise dos resultados do relatório IoT Snapshot 2024 são apresentados nas subseções 4.2.1 a 4.2.10.

4.2.1 Perfil Econômico das Empresas Respondentes

O levantamento realizado pelo relatório IoT Snapshot 2024 revela uma heterogeneidade significativa no perfil econômico das empresas respondentes, com diferenças marcantes entre o Brasil e a América Hispânica. No Brasil, 59% das empresas participantes apresentam faturamento anual superior a R\$ 500 milhões, evidenciando uma predominância de grandes organizações. Essa concentração sugere que, no contexto brasileiro, a adoção de soluções de IoT é mais comum entre empresas de maior porte, provavelmente em função da maior capacidade de investimento e da infraestrutura necessária para suportar tecnologias emergentes.

Por outro lado, na América Hispânica, apenas 22% das empresas respondentes possuem faturamento superior a USD 100 milhões. A distribuição de faturamento na região é mais dispersa, com uma parcela considerável de organizações pertencentes a faixas de faturamento inferiores e 38% das empresas não informando seus números financeiros. Essa disparidade pode indicar que, em alguns países da América Hispânica, a adoção de IoT está em um estágio mais embrionário, sendo liderada por empresas de menor porte ou por organizações que ainda estão explorando a viabilidade de investimentos em tecnologia.

A análise das faixas de faturamento também sugere um maior amadurecimento do mercado brasileiro na adoção de IoT, com um perfil corporativo mais consolidado e propenso a incorporar inovações digitais. Por outro lado, a dispersão na América Hispânica pode refletir desafios estruturais e econômicos, como limitações de recursos financeiros e falta de infraestrutura tecnológica, que dificultam a adoção massiva de IoT nesses países.

A predominância de grandes empresas no Brasil pode explicar o maior número de projetos IoT em fase de produção, enquanto na América Hispânica observa-se um processo mais gradual de implementação. Esses dados são indicativos de que, embora o interesse por IoT

esteja crescendo em toda a região, a maturidade tecnológica e a capacidade de adoção variam significativamente entre os mercados, sendo influenciadas por fatores econômicos, estruturais e culturais.

4.2.2 Perfis dos Executivos Envolvidos nas Iniciativas de IoT

A composição dos cargos dos respondentes da pesquisa IoT Snapshot 2024 reflete o envolvimento estratégico de diferentes níveis hierárquicos nas iniciativas de IoT, tanto no Brasil quanto na América Hispânica. No Brasil, observa-se uma predominância de lideranças, com 23% dos respondentes ocupando posições de *C-Level*, 13% como diretores de TI e 35% como gerentes seniores de TI. Esses dados indicam que as decisões relacionadas à IoT estão sendo tomadas em níveis estratégicos e operacionais, demonstrando um alinhamento entre tecnologia e objetivos de negócios.

A participação de profissionais de alto escalão sugere que a IoT tem sido tratada como um elemento essencial na transformação digital das empresas brasileiras. A presença significativa de gerentes seniores reforça que a execução desses projetos está sob uma gestão próxima e integrada, o que pode favorecer a eficácia dos projetos em andamento.

Por outro lado, nos países da América Hispânica, a pesquisa revela uma estrutura mais distribuída, com 31% dos respondentes em cargos de *C-Level*, mas uma proporção maior (53%) de coordenadores, assessores e especialistas. Essa configuração pode indicar que, nessa região, as iniciativas de IoT estão em uma fase mais exploratória, com maior dependência de equipes técnicas para desenvolver soluções e validar conceitos. Essa abordagem descentralizada pode proporcionar flexibilidade na implementação, embora também exija um esforço maior para alinhar as iniciativas aos objetivos estratégicos a longo prazo.

A comparação entre as duas regiões sugere que o Brasil apresenta uma adoção mais madura, com um maior alinhamento entre as lideranças e as operações. Enquanto isso, na América Hispânica, o desenvolvimento das iniciativas de IoT parece estar mais focado na fase técnica, com potencial para evoluir à medida que as equipes técnicas e estratégicas se integrem de forma mais eficiente.

Dessa forma, a adoção de IoT na América Latina está sendo moldada por diferentes dinâmicas organizacionais. No Brasil, a liderança estratégica desempenha um papel essencial na expansão das iniciativas, enquanto na América Hispânica, as equipes técnicas são protagonistas na construção das bases para futuros avanços. A evolução da IoT na região dependerá, em última análise, da capacidade das organizações de equilibrar a visão estratégica

com a expertise técnica, garantindo que a tecnologia seja uma alavanca eficaz para a inovação e o crescimento sustentável.

4.2.3 Análise da Distribuição por Segmentos de Atuação

A distribuição da adoção de IoT entre diferentes setores econômicos no Brasil e na América Hispânica, conforme apresentada no IoT Snapshot 2024, revela uma concentração significativa nos segmentos de serviços e manufatura. No Brasil, 35% dos respondentes pertencem ao setor de serviços, seguido por 27% na manufatura e 21% no comércio. Essa configuração sugere que a adoção de IoT está fortemente ligada à necessidade de otimização de processos e melhoria da eficiência operacional, especificamente em setores que lidam diretamente com consumidores e cadeia produtiva.

A presença do setor de saúde, com 11% dos respondentes, e da educação, com 7%, destaca a importância da IoT para modernizar operações e aprimorar a prestação de serviços nesses segmentos, particularmente no contexto de digitalização acelerada após a pandemia. Já a manufatura se mostra relevante no Brasil, refletindo o avanço de iniciativas de I4.0, onde a IoT é fundamental para integrar dispositivos inteligentes e otimizar a produção. O comércio também figura como um setor relevante, sobretudo na adoção de tecnologias para melhorar a experiência do cliente e a logística.

Nos países da América Hispânica, o setor de serviços é ainda mais expressivo, com 47% dos respondentes, o que indica uma demanda crescente por soluções de IoT para aprimorar operações e ampliar a inovação. O governo aparece como um setor importante, representando 18% dos respondentes, sugerindo que há interesse na implementação de projetos de cidades inteligentes e na modernização da gestão pública. Isso demonstra que a IoT está sendo adotada não apenas por empresas privadas, mas também por administrações públicas interessadas em melhorar a eficiência e a qualidade dos serviços oferecidos à população.

Essa análise evidencia uma diferença na priorização dos setores entre Brasil e América Hispânica. No Brasil, a ênfase recai sobre manufatura e comércio, refletindo uma maior maturidade na adoção de soluções voltadas para eficiência operacional. Na América Hispânica, por outro lado, a presença significativa do setor público e de serviços indica que a IoT está sendo utilizada como ferramenta para modernização e expansão das infraestruturas básicas e digitais.

A diversidade setorial na adoção de IoT também traz desafios específicos para cada contexto. A implementação de soluções em saúde, por exemplo, requer atenção à regulamentação e à segurança dos dados. No setor público, a integração de diferentes sistemas

e a superação de barreiras burocráticas são essenciais para o sucesso das iniciativas. A expansão da IoT nesses segmentos depende, portanto, de uma abordagem estratégica que envolva tanto investimento em tecnologia quanto capacitação e gestão eficiente.

Sendo assim, a adoção de IoT está crescendo de forma significativa em diversos setores na América Latina, com destaque para serviços, manufatura e governo. No entanto, para que essas iniciativas atinjam seu potencial pleno, é necessário superar obstáculos relacionados à integração tecnológica, capacitação das equipes e desenvolvimento de soluções específicas para cada setor. Esse cenário aponta para uma trajetória de crescimento promissora, mas que exige planejamento cuidadoso e colaboração entre diferentes atores do ecossistema de IoT.

4.2.4 Evolução e Nível de Adoção de IoT

O relatório IoT Snapshot 2024 revela uma tendência de crescimento contínuo na adoção de soluções de IoT na América Latina, embora com variações significativas entre o Brasil e os países da América Hispânica. A adoção de IoT, que inclui iniciativas em PoC, projetos-piloto e soluções em produção, apresentou uma evolução substancial na região desde 2018. O total de empresas na América Latina com iniciativas de IoT aumentou de 31% em 2019 para 58% em 2023, consolidando a tecnologia como uma realidade em diversos setores econômicos.

A análise comparativa entre o Brasil e a América Hispânica evidencia dinâmicas distintas de adoção. No Brasil, a adoção manteve-se relativamente estável, com uma leve redução de 57% em 2021 para 56% em 2023. Esse comportamento sugere que o mercado brasileiro já atingiu um nível de maturidade mais avançado, onde as empresas estão focadas na otimização e expansão das iniciativas existentes, ao invés de implementar novos projetos. Em contrapartida, a América Hispânica apresentou um crescimento expressivo na adoção de IoT, passando de 47% em 2021 para 61% em 2023, o que demonstra um processo acelerado de transformação digital em curso nesses países.

A análise da evolução das soluções em produção destaca um aumento significativo tanto no Brasil quanto na América Hispânica. No Brasil, a proporção de empresas com soluções já em produção passou de 36% em 2021 para 46% em 2023, enquanto na América Hispânica esse número cresceu de 32% para 49% no mesmo período. Esses dados indicam que, à medida que as iniciativas de IoT avançam para fases mais maduras, as empresas começam a colher os benefícios operacionais da tecnologia.

O crescimento desigual entre o Brasil e a América Hispânica pode ser explicado por fatores estruturais e econômicos. O Brasil, com maior capacidade de investimento e um ecossistema mais maduro, estabilizou sua adoção de IoT, enquanto os países da América

Hispânica ainda estão em um processo de expansão e implementação de novas iniciativas. No entanto, o fato de a América Hispânica ter superado o Brasil em termos de adoção geral sugere que as barreiras iniciais estão sendo superadas e que há um movimento consistente em direção à transformação digital em toda a região.

Esses resultados reforçam a importância de continuar investindo em projetos de IoT e consolidar os avanços já obtidos. A evolução dos projetos para fases de produção é um indicativo de que as empresas estão começando a integrar IoT em seus processos de maneira estratégica, buscando ganhos de eficiência, redução de custos e inovação. No entanto, é essencial que as organizações mantenham esforços contínuos para lidar com os desafios associados à implementação e ampliação dessas iniciativas, particularmente nos mercados menos maduros da América Hispânica.

4.2.5 Expectativa e Realidade sobre a Importância da IoT

Os dados apresentados pelo IoT Snapshot 2024 revelam uma discrepância consistente entre as expectativas projetadas para a importância da IoT e a realidade percebida nos anos subsequentes. Ao longo do período analisado, as expectativas dos executivos em relação ao impacto estratégico da IoT se mostraram significativamente mais elevadas do que a importância que a tecnologia efetivamente alcançou no contexto empresarial.

Em 2017, a expectativa era de que 71% das empresas considerariam IoT como uma tecnologia de alta ou muito alta importância em um horizonte de 3 a 5 anos. No entanto, em 2021, apenas 33% dos respondentes avaliaram a IoT como altamente relevante, resultando em uma diferença de 38 pontos percentuais entre expectativa e realidade. A mesma tendência foi observada em 2019, quando se esperava que 76% das empresas reconhecessem a importância da IoT até 2023, mas a percepção real ficou em apenas 40%.

Essa discrepância sugere que, embora a IoT tenha sido considerada promissora e estratégica nos planejamentos iniciais, os resultados práticos e a integração efetiva da tecnologia não se desenvolveram na mesma velocidade. Esse desalinhamento pode ser explicado por diversos fatores, como desafios técnicos, barreiras culturais e dificuldades na obtenção de resultados rápidos e tangíveis que justificassem os investimentos. Além disso, a rápida evolução de outras tecnologias emergentes, como inteligência artificial e 5G, pode ter deslocado parte do foco que anteriormente era direcionado à IoT.

A análise longitudinal também sugere que as empresas subestimaram a complexidade envolvida na adoção de IoT em larga escala. Embora a tecnologia tenha avançado e

demonstrado benefícios, a integração completa com os processos de negócio e a geração de valor concreto parecem ter ocorrido de forma mais lenta do que o esperado.

Essa diferença entre expectativa e realidade reforça a importância de alinhar os planejamentos estratégicos com a capacidade real de implementação e resultados tangíveis. As organizações precisam considerar que, para que a IoT atinja todo o seu potencial, é necessário investir não apenas na tecnologia em si, mas também em mudanças organizacionais, capacitação das equipes e gestão de expectativas quanto aos prazos e retornos dos investimentos.

4.2.6 Desafios para Adoção de IoT nas Empresas Latino-Americanas

A adoção de IoT nas empresas latino-americanas enfrenta desafios que se estendem por questões financeiras, culturais e estruturais, conforme os dados apresentados no IoT Snapshot 2024. No Brasil, o principal obstáculo identificado é a viabilidade financeira, apontada por 37% dos respondentes, refletindo a dificuldade de justificar investimentos e demonstrar retorno econômico. Esse fator revela que, embora a IoT seja vista como uma tecnologia promissora, sua implementação ainda enfrenta barreiras relacionadas ao custo-benefício e à alocação de recursos. Já na América Hispânica, o orçamento é o desafio mais citado, com 51% das respostas, evidenciando uma limitação financeira mais pronunciada nas empresas da região.

Outro inibidor significativo em ambos os contextos é a resistência à mudança, citada por 35% dos respondentes no Brasil e por 37% na América Hispânica. Esse dado sugere que, além de questões técnicas, a transformação digital esbarra em barreiras culturais e organizacionais, exigindo esforços para promover uma cultura de inovação e engajamento com as novas tecnologias. A falta de soluções específicas para cada setor também foi mencionada por 33% no Brasil e 26% na América Hispânica, apontando a necessidade de adaptar as implementações de IoT às particularidades de cada negócio.

Em termos estruturais, no Brasil, 25% dos respondentes indicaram a conectividade e a infraestrutura de telecomunicações como desafios, destacando a importância de uma infraestrutura robusta para suportar a expansão de IoT. Na América Hispânica, essa questão foi menos expressiva, com apenas 10% mencionando-a como obstáculo, o que sugere diferentes níveis de maturidade e infraestrutura entre os países da região.

A capacitação da mão de obra também se revelou um desafio relevante, com 21% das empresas brasileiras e 23% das hispânicas afirmando que a falta de profissionais qualificados impede a implementação eficaz de IoT. A necessidade de parceiros especializados foi apontada

por 14% dos respondentes em ambas as regiões, indicando que o sucesso da adoção de IoT depende não apenas de recursos internos, mas também de uma rede de suporte qualificada.

A comparação entre as duas regiões revela nuances importantes: enquanto o Brasil enfrenta mais dificuldades relacionadas à justificativa econômica e à infraestrutura, na América Hispânica a questão financeira é mais crítica, indicando que os recursos disponíveis são um fator determinante para a viabilidade dos projetos. Ambos os contextos, no entanto, compartilham a resistência à mudança e a falta de mão de obra qualificada como barreiras centrais, evidenciando que a adoção de IoT não se resume apenas à aquisição de tecnologia, mas também à transformação cultural e ao desenvolvimento de habilidades.

Assim, a superação desses desafios exige uma abordagem estratégica integrada, que alinhe investimentos financeiros, capacitação técnica e esforços para criar uma cultura organizacional aberta à inovação. Além disso, a colaboração com parceiros qualificados e o desenvolvimento de soluções específicas para cada setor serão fundamentais para garantir que a IoT possa entregar valor real e sustentável para as empresas da região.

4.2.7 Capacitação de Profissionais em Tecnologias Relacionadas à IoT

Os dados apresentados revelam um cenário preocupante em relação à capacitação das equipes internas para lidar com tecnologias emergentes associadas à IoT. Tanto no Brasil quanto na América Hispânica, verifica-se um déficit significativo de profissionais preparados para implementar e gerenciar essas soluções, o que pode representar um obstáculo importante para a adoção e o sucesso dos projetos de IoT na região. Embora algumas áreas apresentem maior maturidade, há uma lacuna crítica em setores estratégicos, como IA e plataformas de gestão de IoT.

No Brasil, o maior grau de maturidade está concentrado na área de rede e conectividade, com 84% das empresas classificando seus colaboradores como muito preparados ou preparados. Isso reflete a importância da infraestrutura de conectividade como base essencial para suportar a implementação de IoT. No entanto, em áreas mais sofisticadas, como IA, desenvolvimento de aplicações e plataformas de IoT, a realidade é menos otimista. Apenas 23% das empresas possuem equipes qualificadas em IA, o que pode limitar sua capacidade de transformar dados em informações e automações eficientes. Essa lacuna indica que, apesar do avanço na infraestrutura, o domínio sobre tecnologias mais avançadas ainda é insuficiente.

Na América Hispânica, o cenário é similar, mas a preparação das equipes encontra-se em um estágio mais inicial. Embora a área de rede e conectividade também apresente maturidade, com 81% das empresas afirmando possuir equipes bem preparadas, o preparo em

IA é ainda mais preocupante. Cerca de 85% dos respondentes indicam que suas equipes são pouco ou nada preparadas para lidar com essa tecnologia. Essa falta de qualificação é preocupante, uma vez que IA possui um grande potencial para transformar dados em valor de negócios por meio de análises preditivas e automação de processos. A falta de preparação em IA e em outras tecnologias críticas sugere que as empresas ainda estão longe de explorar plenamente o potencial da IoT.

Esse cenário evidencia que, embora a infraestrutura básica esteja relativamente consolidada, há um déficit significativo em áreas mais avançadas. A falta de capacitação pode ser atribuída não apenas à rápida evolução das tecnologias, mas também à escassez de investimentos em formação contínua. Esse contexto destaca a necessidade urgente de programas de treinamento para garantir que as empresas possam não apenas implementar soluções de IoT, mas também inovar e ampliar sua competitividade. A escassez de especialistas pode se tornar um gargalo crítico para a expansão da IoT na América Latina, dificultando a captura do valor total gerado pelos dispositivos conectados e a integração eficiente das soluções nos processos de negócio.

Portanto, além de investir na aquisição de tecnologias, as organizações devem priorizar a formação de suas equipes, promovendo parcerias com instituições de ensino e programas de treinamento especializados. Esse investimento em capacitação é essencial para assegurar que as empresas estejam preparadas para enfrentar os desafios impostos pela transformação digital. Somente com equipes qualificadas será possível integrar plenamente a IoT às operações e, assim, aproveitar todo o seu potencial para inovação e crescimento sustentável.

4.2.8 Análise do Investimento em IoT

O relatório apresenta uma visão clara sobre as tendências de investimento em IoT na América Latina, comparando os orçamentos de 2023 com os de 2022. A análise dos dados revela que tanto o Brasil quanto os países da América Hispânica estão consolidando seus investimentos em IoT, embora com nuances distintas entre as duas regiões.

No Brasil, 56% das empresas afirmaram que seus orçamentos para IoT em 2023 foram iguais ou maiores do que em 2022. Entre essas, 28% aumentaram seus investimentos, demonstrando que as empresas brasileiras continuam engajadas em expandir ou fortalecer suas iniciativas de IoT. No entanto, 22% das organizações ainda estão definindo seus investimentos, e 34% indicaram que não sabem ou não planejam destinar recursos para IoT em 2023. Esse cenário revela que, embora haja um grupo significativo de empresas comprometidas com a continuidade dos projetos de IoT, um número expressivo ainda demonstra incertezas ou adota

uma postura conservadora, particularmente em um contexto de desafios econômicos e tecnológicos.

Na América Hispânica, o cenário é ligeiramente mais positivo. Cerca de 65% das empresas mantiveram ou aumentaram seus investimentos em IoT em 2023, com 33% relatando aumento no orçamento. Isso sugere que a região está em um estágio de crescimento nas iniciativas de IoT, com um movimento claro em direção à ampliação das capacidades digitais. No entanto, a parcela de empresas que ainda não decidiu seus investimentos (19%) ou não prevê orçamento (5%) revela que o processo de adoção ainda encontra alguns desafios.

A comparação entre as duas regiões sugere que a América Hispânica está mais propensa a aumentar seus investimentos em IoT, enquanto no Brasil há uma tendência de estabilidade nos orçamentos. Essa diferença pode ser explicada por fatores como o maior grau de maturidade do mercado brasileiro, que já possui uma base consolidada de projetos, enquanto os países da América Hispânica ainda estão em uma fase de expansão e experimentação.

Essa análise também destaca a importância da definição clara de investimentos em IoT. O fato de um número significativo de empresas em ambas as regiões ainda estar em fase de planejamento ou sem previsão de orçamento sugere a necessidade de maior clareza estratégica por parte das organizações. Projetos de IoT exigem não apenas recursos financeiros, mas também uma visão de longo prazo que alinhe a tecnologia aos objetivos de negócio.

O cenário de investimentos em IoT na América Latina é promissor, mas ainda enfrenta desafios relacionados à definição orçamentária e ao alinhamento estratégico. Para que a IoT atinja seu potencial máximo na região, é essencial que as empresas superem as incertezas e integrem a tecnologia de forma mais profunda aos seus processos de negócios. Assim, investimentos contínuos e planejados serão fundamentais para consolidar os benefícios esperados dessas tecnologias emergentes.

4.2.9 Adoção de Plataformas de IoT

A integração de plataformas de IoT ainda se encontra em estágio inicial tanto no Brasil quanto nos países da América Hispânica, conforme revelado pelo IoT Snapshot 2024. Os dados apontam para uma tendência de exploração e estudo desses sistemas integrados, que são fundamentais para o sucesso de projetos de IoT, especialmente à medida que as iniciativas passam das fases de PoC para a fase de produção. No entanto, os números mostram que a adoção de plataformas integradas ainda é limitada em ambas as regiões, com uma parte significativa das empresas ainda em fase de planejamento ou desconhecendo o uso dessas tecnologias.

No Brasil, apenas 18% das empresas já possuem soluções de IoT parcialmente ou totalmente integradas por meio de plataformas. Isso reflete o estágio incipiente da adoção de plataformas fim a fim, que permitem a integração eficiente de diversos módulos e fornecedores em um ecossistema IoT. A baixa taxa de adoção pode estar associada à complexidade técnica e ao custo de implementação dessas plataformas, além da necessidade de maturidade organizacional para lidar com a integração de dados e sistemas de múltiplas áreas.

Por outro lado, 42% das empresas no Brasil estão em fase de estudo sobre a possibilidade de integrar plataformas de IoT, indicando um interesse crescente e uma expectativa de que a adoção dessas soluções aumentará nos próximos anos. Entretanto, há um número expressivo de empresas (10%) que não possuem conhecimento ou objetivos claros sobre o uso de plataformas, o que aponta para a necessidade de mais capacitação e conscientização sobre os benefícios dessas tecnologias.

Nos países da América Hispânica, a adoção de plataformas de IoT também está em fase inicial, com apenas 12% das empresas relatando integração parcial ou total. No entanto, 43% das empresas estão explorando a viabilidade de integrar plataformas em suas operações, o que sugere que o mercado está em processo de amadurecimento, embora em um ritmo mais lento em comparação ao Brasil.

Um dado preocupante é que 11% das empresas na América Hispânica indicaram que não possuem conhecimento ou objetivos estabelecidos para a integração de plataformas de IoT. Esse fator pode ser um reflexo de desafios estruturais e econômicos enfrentados por essas empresas, além de uma possível falta de recursos técnicos e expertise para lidar com a complexidade da integração de sistemas IoT.

A baixa taxa de implementação de plataformas de IoT em ambas as regiões ressalta a complexidade dos projetos que envolvem múltiplas tecnologias e fornecedores. A integração eficiente é fundamental para que as empresas possam capturar todo o valor dos dados gerados por dispositivos IoT e automatizar processos de maneira eficaz. No entanto, a fase inicial de adoção sugere que muitas empresas ainda estão enfrentando desafios para alinhar suas estratégias de IoT com as plataformas tecnológicas necessárias.

Além disso, a falta de conhecimento ou objetivos claros sobre a adoção de plataformas de IoT por parte de algumas empresas, particularmente na América Hispânica, destaca a necessidade de mais iniciativas na capacitação e conscientização. Sem uma plataforma centralizada para gerenciar e integrar dados e sistemas IoT, as empresas podem ter dificuldade em escalar suas operações de forma eficiente e segura.

A adoção de plataformas de IoT na América Latina ainda está em desenvolvimento, e muitos projetos ainda estão em fases exploratórias. Para que a IoT possa se consolidar como uma tecnologia transformadora, é essencial que as empresas invistam não apenas na aquisição de dispositivos conectados, mas também em plataformas robustas que possam integrar esses dispositivos de maneira coesa e eficiente. O sucesso dos projetos de IoT dependerá, em grande parte, da capacidade das organizações de superar os desafios técnicos e organizacionais associados à integração de múltiplos sistemas e fornecedores.

4.2.10 Abordagens de Segurança para IoT

A segurança cibernética é uma preocupação crítica para projetos de IoT, dado o aumento da conectividade e da exposição a riscos digitais. No entanto, o IoT Snapshot 2024 revela que, embora haja avanços em algumas áreas, a integração de medidas de segurança ainda é limitada e desigual entre o Brasil e os países da América Hispânica.

No Brasil, 40% das empresas afirmaram adotar o conceito de *security by design*, ou seja, inserem a segurança desde o início dos projetos de IoT. Essa prática sugere uma maturidade maior na abordagem da segurança, refletindo um entendimento sobre a importância de antecipar riscos e integrar medidas de proteção ao longo do desenvolvimento das soluções. No entanto, há desafios: 10% das empresas identificaram lacunas de conhecimento técnico e soluções de segurança, o que pode comprometer a eficácia dessas iniciativas a longo prazo.

Além disso, uma parcela relevante (28%) trata a segurança como item específico durante o detalhamento do projeto, indicando que, embora exista algum nível de preparo, essa abordagem pode ser reativa, em vez de preventiva. Um dado preocupante é que 12% das empresas brasileiras não consideram segurança um tema relevante, uma vez que operam com redes fechadas. Esse tipo de estratégia, embora possa reduzir alguns riscos imediatos, pode expor as organizações a vulnerabilidades caso as redes precisem se expandir ou se conectar com outros sistemas.

Nos países da América Hispânica, apenas 18% das empresas adotam o conceito de *security by design*. Isso sugere que a segurança ainda não é tratada como prioridade estratégica durante as fases iniciais dos projetos. A maioria das empresas aborda a segurança de forma fragmentada: 18% indicam que a segurança é tratada durante o detalhamento do projeto, enquanto 27% não consideram medidas específicas de proteção por utilizarem redes fechadas. Essa estratégia, embora possa funcionar em curto prazo, limita a escalabilidade e a resiliência das operações no futuro, sobretudo em ambientes conectados.

Ademais, 20% das empresas na América Hispânica reconhecem a existência de lacunas de conhecimento e soluções de segurança, o que destaca a necessidade urgente de capacitação técnica e de investimentos em segurança cibernética. A falta de integração de segurança desde o início do projeto pode resultar em vulnerabilidades significativas, sobretudo à medida que as operações se tornam mais digitalizadas.

A análise dos dados revela que, embora haja avanços na conscientização sobre a importância da segurança para IoT, a adoção de práticas estruturadas e integradas ainda é insuficiente, notadamente na América Hispânica. As abordagens fragmentadas e a dependência de redes fechadas podem representar um risco significativo à medida que as empresas buscam expandir seus projetos e conectar sistemas com outras plataformas.

Para garantir a sustentabilidade das iniciativas de IoT, é essencial que as empresas adotem uma postura proativa e abrangente em relação à segurança cibernética. A implementação de *security by design* deve ser uma prática disseminada, não apenas como uma medida técnica, mas também como parte da cultura organizacional. Além disso, é fundamental investir na capacitação das equipes e no desenvolvimento de competências para lidar com as ameaças digitais em um cenário de rápida transformação tecnológica.

4.3 Comparação entre as fontes de pesquisa

Nesta subseção, apresentamos uma análise comparativa entre os resultados obtidos a partir da RSL e os dados secundários extraídos do relatório IoT Snapshot 2024. No Quadro 4, são apresentadas as convergências e divergências entre os dois enfoques, destacando-se aspectos críticos relacionados aos benefícios, barreiras, setores de adoção, desafios organizacionais e questões de segurança e maturidade tecnológica.

Quadro 4 – Comparativo entre RSL versus Dados Secundários

Aspecto	Revisão Sistemática da Literatura	IoT Snapshot 2024
Foco Geográfico	Internacional (Países da Europa e Ásia)	América Latina (Brasil e América Hispânica)
Benefícios Principais	Automação, eficiência, redução de custos	Eficiência operacional e inovação
Barreiras	Altos custos, falta de conhecimento, resistência à mudança	Limitações financeiras, resistência cultural
Setores com Maior Adoção	Manufatura, serviços e comércio eletrônico	Serviços 47% na América Hispânica e 35% no Brasil
Desempenho	Ganhos de eficiência com integração gradual	Descompasso entre expectativa e resultados percebidos
Investimentos	Necessidade de altos investimentos iniciais	Estabilidade no Brasil; crescimento na América Hispânica

Capacitação e Recursos	Escassez de conhecimento especializado	Demanda por qualificação e especialização técnica
Segurança e Privacidade	Preocupações com riscos cibernéticos	Adoção desigual de medidas de segurança
Maturidade Organizacional	Adaptação lenta ao novo contexto produtivo	Maturidade maior no Brasil; fase exploratória na América Hispânica
Expectativa vs Realidade	Expectativas frequentemente superestimadas	Apenas 40% das empresas reconheceram a importância estratégica até 2023

Fonte: Próprio autor (2024).

A comparação entre a RSL e os dados secundários revela diferenças significativas nos contextos geográficos e organizacionais analisados, refletindo a diversidade das realidades enfrentadas pelas empresas no processo de adoção das tecnologias da IoT e da I4.0. Enquanto a RSL adota um enfoque global, explorando tanto casos de sucesso quanto desafios encontrados em diferentes partes do mundo, o IoT Snapshot 2024 foca especificamente na América Latina, com destaque para o Brasil e a América Hispânica.

No que se refere aos benefícios identificados, ambas as fontes convergem na ênfase sobre o aumento da eficiência operacional e a inovação como os principais ganhos proporcionados pela adoção da IoT. A literatura sublinha também a automação e a redução de custos como fatores fundamentais, enquanto o relatório de dados secundários ressalta a relevância da inovação para a competitividade, especialmente em economias emergentes. Essa divergência reflete a necessidade de adaptação tecnológica nos diferentes contextos analisados.

As barreiras enfrentadas na implementação da IoT também apresentam nuances específicas. A RSL destaca obstáculos comuns, como altos custos de implementação e resistência à mudança, ao passo que os dados secundários apontam para limitações financeiras mais acentuadas na América Hispânica, além de desafios culturais relacionados à resistência à inovação. Essa diferenciação evidencia que, embora as dificuldades econômicas sejam uma constante, os fatores culturais assumem papel de destaque em determinadas regiões.

A adoção setorial da IoT e da I4.0 também apresenta características distintas. A RSL reporta uma predominância dessas tecnologias na manufatura e no comércio eletrônico, alinhando-se ao conceito de fábricas inteligentes. Por outro lado, o relatório destaca que, na América Hispânica (47%) e no Brasil (35%), o setor de serviços lidera a adoção, seguido pela manufatura no Brasil (27%). Essa variação pode ser explicada pelas diferenças nas estruturas econômicas e na maturidade dos setores produtivos em cada país.

Outra convergência relevante diz respeito à discrepância entre as expectativas iniciais e os resultados práticos observados. Tanto a RSL quanto os dados secundários indicam que as

empresas frequentemente superestimam os impactos positivos da IoT, levando a um descompasso entre expectativa e realidade. O relatório destaca que apenas 40% das empresas no Brasil reconheceram a importância estratégica da IoT em 2023, sugerindo que a maturação das tecnologias ocorre de forma mais lenta do que o previsto.

Em termos de investimentos, a RSL aponta para a necessidade de altos aportes financeiros iniciais, enquanto o relatório revela que, no Brasil, o investimento em IoT já se estabilizou, ao passo que na América Hispânica ele continua crescendo. Essa diferença sugere que o mercado brasileiro já alcançou um nível maior de maturidade tecnológica, enquanto outros países da região ainda estão em fase de expansão.

No que tange à segurança cibernética e à capacitação técnica, ambas as análises convergem para a identificação de desafios críticos. A RSL ressalta os riscos cibernéticos associados à implementação da IoT, enquanto os dados secundários mostram que as medidas de segurança são adotadas de forma desigual entre os países latino-americanos. A necessidade de qualificação técnica é enfatizada em ambas as fontes, apontando para a relevância da especialização para garantir uma adoção eficaz das tecnologias emergentes.

Por fim, a maturidade organizacional é outro ponto de divergência relevante. A revisão sistemática sugere que a adaptação das empresas às novas tecnologias é um processo lento e gradual. Em consonância, o relatório IoT Snapshot 2024 indica que o Brasil apresenta maior maturidade tecnológica, enquanto os países da América Hispânica ainda estão em uma fase exploratória, dependendo mais fortemente de apoio externo e de desenvolvimento técnico.

4.4 Prova de conceito

A adoção da I4.0 pelas PMEs apresenta desafios estruturais, tecnológicos e financeiros, conforme identificado na RSL e na análise dos dados secundários. Um dos principais obstáculos é a modernização de máquinas legadas, que, embora ainda essenciais para a produção, não possuem conectividade nativa com redes digitais. Diante disso, a implementação PoC se torna uma estratégia essencial para demonstrar a viabilidade técnica e econômica da integração de uma solução IIoT nesses ambientes produtivos, possibilitando que as PMEs experimentem essa transformação de forma controlada e progressiva.

Apesar dos benefícios potenciais da implementação da IIoT em máquinas legadas, a revisão da literatura também indicou desafios, como a resistência à mudança, a necessidade de capacitação profissional e o investimento inicial elevado para adaptação tecnológica. A PoC permite que esses desafios sejam mitigados, oferecendo uma abordagem escalável e acessível para as PMEs.

A PoC desenvolvida nesta pesquisa tem como base as necessidades identificadas no setor industrial tradicional, que, conforme os dados analisados, demanda suporte significativo para ingressar no ecossistema da I4.0, visto que apenas 27% da manufatura adotou soluções IoT e 46% têm soluções em produção no Brasil em 2023. Nesse contexto, foi selecionado um torno universal, equipamento amplamente utilizado no setor da transformação, devido à sua versatilidade e longa vida útil. A escolha desse equipamento visa representar um cenário real enfrentado por muitas empresas que, apesar da necessidade de inovação, ainda operam com recursos limitados e máquinas sem capacidade de conectividade nativa.

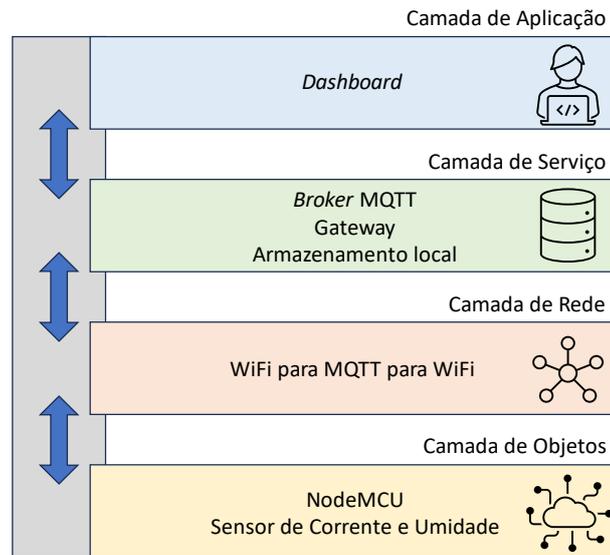
Neste estudo, a implementação da PoC seguiu as etapas do PoC Design (concepção, construir, avaliar e aprender), garantindo uma estrutura metodológica robusta para a validação da solução proposta. A seguir, cada uma dessas etapas será detalhada, demonstrando o processo de desenvolvimento, os desafios enfrentados e os resultados obtidos com a aplicação da solução no torno universal.

4.4.1 Concepção

A etapa de Concepção transformou a arquitetura do sistema de uma forma abstrata para um projeto concreto. Através de reuniões com a Coordenação da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe (São Carlos – SP), identificou-se a máquina com disponibilidade para o estudo e as variáveis iniciais para o desenvolvimento da PoC. Especificamente, foi selecionado um torno universal, modelo Tormax 30 fabricado pela Romi em 2007, utilizado no próprio campus. Com relação às variáveis, foram escolhidas a corrente elétrica, umidade e temperatura, por serem de fácil implementação através de sensores já disponíveis.

Com base nessas definições iniciais, foi desenvolvido o design da arquitetura do sistema. A Figura 12 mostra o design da arquitetura do sistema, onde cada camada foi especificada com base em requisitos técnicos. Os componentes foram selecionados considerando disponibilidade, preço e tempo de implementação.

Figura 12 – Design da arquitetura



Fonte: Próprio autor (2023).

A arquitetura do sistema foi dividida em camadas, cada uma com funções específicas:

- A função da camada de objeto é realizar a detecção das variáveis do ambiente e dos equipamentos monitorados, enviando essas informações para a camada superior. Os componentes dessa camada incluem o sensor de corrente não invasivo SCT-013, utilizado para medir a corrente elétrica consumida pelos equipamentos; o sensor de umidade e temperatura DHT11, responsável por coletar dados ambientais; NodeMCU¹, que atua como elemento de processamento; e o circuito de condicionamento de sinais, utilizado para ajustar os dados capturados pelos sensores. Esses dispositivos desempenham o papel de *publishers* dentro da arquitetura *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT²), realizando a coleta das variáveis monitoradas e publicando-as em tópicos específicos para que possam ser processadas pelas camadas superiores.

¹ O NodeMCU é uma plataforma de desenvolvimento de código aberto baseado no microcontrolador ESP8266, fabricado pela Espressif Systems, é um microcontrolador econômico e compacto, amplamente utilizado em aplicações de IoT devido à sua conectividade Wi-Fi integrada. Possui um processador de 32 bits Tensilica, operando a até 160 MHz, 160 KB de RAM, suporte a Wi-Fi 2.4 GHz (802.11 b/g/n) e diversos periféricos, como UART, GPIO, I2C, PWM, ADC e SPI.

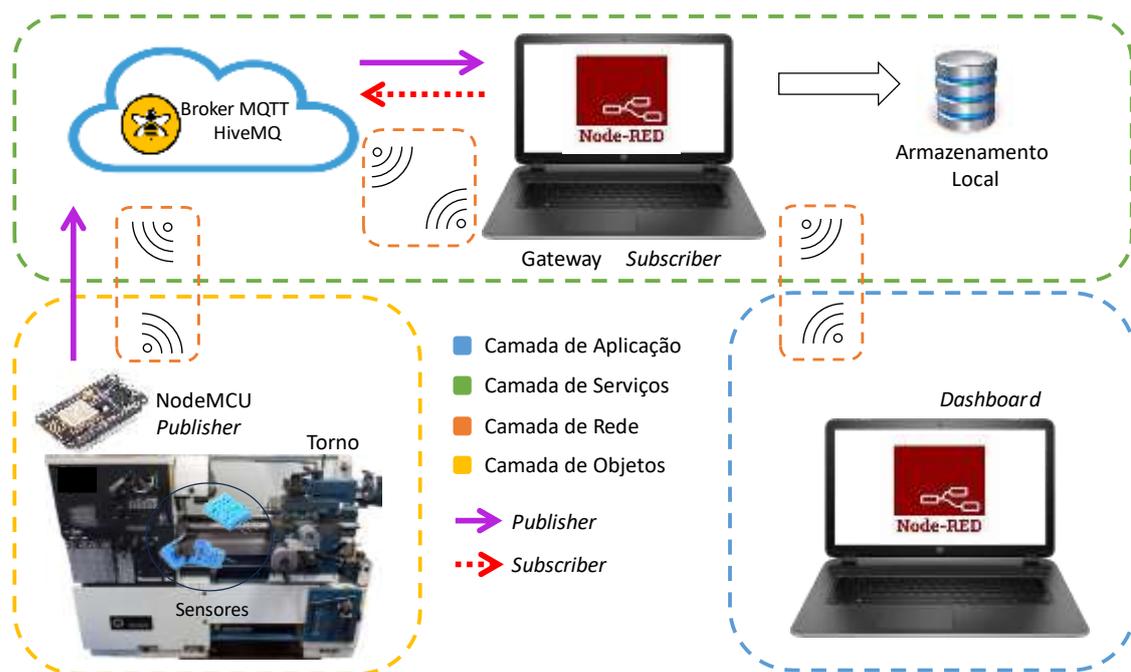
² O MQTT é um protocolo de comunicação leve projetado para transmitir dados em redes com largura de banda limitada e alta latência. Baseia-se no modelo *publish/subscribe*, em que o remetente (publicador) e o destinatário (assinante) se comunicam por meio de tópicos específicos, sem a necessidade de um vínculo direto entre eles. A intermediação da comunicação é feita pelo *broker* MQTT, que recebe as mensagens publicadas, filtra as informações e as distribui corretamente para os assinantes interessados nos respectivos tópicos.

- A camada de rede tem como função estabelecer a comunicação entre os dispositivos conectados e garantir o envio seguro e eficiente dos dados coletados para a camada superior. Essa camada utiliza a arquitetura *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) para assegurar a conectividade e a troca de informações em redes sem fio. No contexto da PoC desenvolvida, a camada de rede é implementada por meio do adaptador Wi-Fi integrado ao NodeMCU, um ponto de acesso sem fio (Access Point Wireless) para conexão Wi-Fi, e um computador com sistema operacional Windows. Além disso, emprega o protocolo de comunicação MQTT, que permite a transmissão de dados de forma leve e eficiente em aplicações de IoT, integrando os diferentes elementos de hardware e software para garantir o fluxo de informações.
- A função da camada de serviços é desenvolver, administrar e fornecer os serviços exigidos para atender às demandas dos usuários e aplicativos de software, garantindo que os dados coletados sejam devidamente processados, transformados e disponibilizados para os sistemas de monitoramento. Entre os componentes dessa camada está o *broker*, um dos principais elementos da arquitetura MQTT, que gerencia a comunicação entre os dispositivos conectados. O *broker*, neste caso, é hospedado na nuvem, recebendo as mensagens publicadas pelos dispositivos e distribuindo-as para os assinantes inscritos nos respectivos tópicos, permitindo o compartilhamento eficiente dos dados coletados. Outro componente importante é o *gateway*, implementado no computador com sistema operacional Windows e utilizando o Node-RED, que atua como um *subscriber* (assinante), recebendo os dados publicados pelos dispositivos da camada de objeto. O *gateway* funciona como um ponto de convergência e transformação de dados, adaptando as informações para diferentes formatos e protocolos, conforme necessário. Por fim, o armazenamento local, também executado no computador Windows, tem a função de armazenar os dados coletados como um backup para posterior consulta de históricos.
- Por fim, a camada de aplicação tem a função de disponibilizar serviços e aplicativos que consolidam e integram as informações provenientes das camadas inferiores, apresentando os dados de forma compreensível e acessível para o usuário final. Nessa camada, destaca-se o *Dashboard*, implementado no Node-RED e executado em um computador com sistema operacional Windows, que

atua como a interface visual do sistema, convertendo dados técnicos em representações gráficas intuitivas. Essa interface é acessada diretamente via navegador web, por meio do endereço `http://IP_DO_GATEWAY:1880/ui`, sem a necessidade de instalação de plataformas adicionais. Como o *Dashboard* é um *plugin* nativo do Node-RED (`node-red-dashboard`), ele opera dentro do fluxo de processamento de dados, eliminando a dependência de serviços externos e proporcionando uma solução integrada, eficiente e de fácil utilização para o monitoramento das informações coletadas.

Além da estrutura em camadas, é importante entender como esses componentes interagem entre si. A topologia da rede, ilustrada na Figura 13, define como os componentes se comunicam entre si e com as demais camadas.

Figura 13 – Diagrama em blocos da topologia



Fonte: Próprio autor (2025).

Os dispositivos físicos da camada de objetos, que compõe o hardware, Figura 13, são os sensores para medir as variáveis temperatura, umidade e corrente elétrica, além do circuito de condicionamento de sinal e o NodeMCU, responsável pela aquisição, processamento de dados e *publisher* da arquitetura MQTT.

O sensor de corrente modelo SCT-013, ilustrado na Figura 14, possui as seguintes características técnicas:

- Corrente de entrada: 0 – 100 A
- Corrente de saída: 0 – 50 mA
- Tipo de saída: analógica
- Incerteza: $\pm 3\%$ para o intervalo entre 10A (10%) e 120A (120%)
- Material do núcleo: ferrite
- Temperatura de trabalho: $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 14 – Sensor de corrente SCT-013

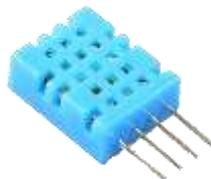


Fonte: Próprio autor (2025).

O sensor de umidade e temperatura modelo DTH11, pode ser visto na Figura 15, possui as seguintes características técnicas:

- Tensão de operação: 3,5 V a 5,5 V
- Corrente de operação: 0,3 mA (medição) 60 μA (espera)
- Saída: dados seriais com 40 bits
- Tipo de saída: digital
- Faixa de temperatura: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Faixa de umidade: 20% a 90%
- Resolução: Temperatura e Umidade são de 16 bits cada
- Incerteza: $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1\%$

Figura 15 – Sensor de umidade e temperatura DTH11



Fonte: Próprio autor (2025).

A camada de rede da Figura 13 adota o protocolo MQTT, amplamente utilizado em aplicações IoT. O MQTT tem como base o Protocolo de Controle de Transmissão (TCP - *Transmission Control Protocol*), responsável pela transmissão de dados, e o Protocolo de Internet (IP - *Internet Protocol*), que identifica os computadores e servidores. O TCP/IP é um conjunto de protocolos que possibilita a comunicação entre computadores e servidores na internet. Desta forma, o MQTT aproveita a infraestrutura da rede local existente estabelecida por meio de um Access Point Wireless para facilitar a troca eficiente de mensagens entre dispositivos IoT. Nesta PoC foi adotado um Access Point Wireless modelo 3CRWE776075, fabricado pela 3COM.

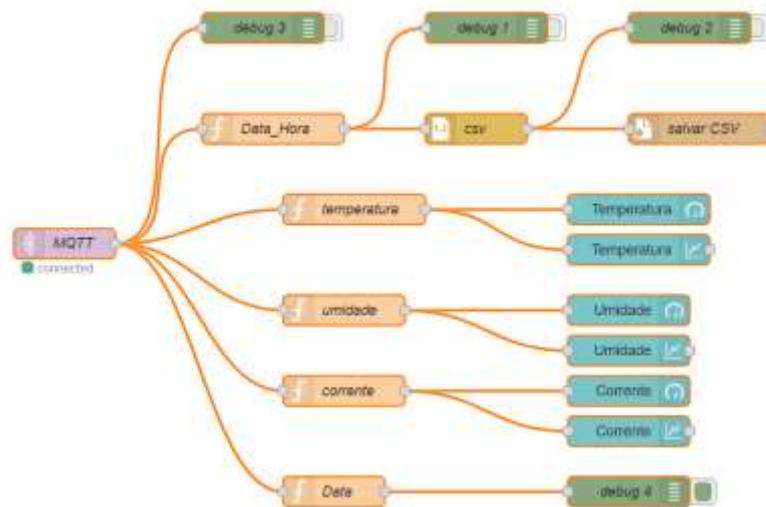
Na Figura 13, a camada de serviços é composta pelo *broker* MQTT, o *gateway* e o armazenamento local. Neste estudo, foi utilizado o *broker* MQTT HiveMQ, um serviço de *broker* MQTT de código aberto e gratuito, executado em nuvem, projetado para facilitar a comunicação entre dispositivos IoT. O HiveMQ é responsável por gerenciar a comunicação dentro da arquitetura *publish/subscribe*, recebendo todas as mensagens publicadas pelos dispositivos (*publishers*), filtrando-as e distribuindo-as para os assinantes (*subscribers*) interessados nos tópicos correspondentes. O uso do HiveMQ elimina a necessidade de instalação local, permitindo que o sistema funcione de maneira eficiente e escalável, principalmente em aplicações distribuídas.

O *broker* MQTT em nuvem, representado na Figura 13, permite a comunicação direta com os dispositivos IoT, enquanto o *gateway*, implementado localmente por meio do Node-RED, atua como ponto de convergência e transformação de dados. Esse *gateway* coleta as mensagens publicadas pelos sensores (*publishers*), por intermédio do *broker*, processa as informações, que inclui a separação dos dados por categoria (temperatura, umidade e corrente), a formatação das mensagens, armazenamento dos dados em arquivo csv para registro histórico e a exibição em *dashboards* visuais interativos, permitindo que o usuário monitore os dados em tempo real.

O *gateway*, representado na Figura 13, atua como um *subscriber* na arquitetura MQTT, foi implementado utilizando a ferramenta Node-RED. O Node-RED é uma plataforma de programação visual que permite conectar dispositivos de hardware, APIs e serviços online, criando fluxos de dados, lógicas e *dashboards* personalizados para aplicações de IoT. No presente estudo, o Node-RED foi executado em um computador local com sistema operacional Windows 10, 64 bits, utilizando a versão 3.0.2 do Node-RED.

A Figura 16 ilustra o fluxo de processamento de dados no Node-RED, evidenciando a estrutura utilizada para coletar, transformar e visualizar as informações provenientes dos dispositivos IoT.

Figura 16 – Gateway implementado via Node-RED



Fonte: Próprio autor (2023).

O nó MQTT recebe os dados utilizando do protocolo de mensagens MQTT para comunicação. Os dados coletados incluem temperatura, umidade, corrente e informações temporais. O fluxo demonstra o processamento desses dados através de vários nós, incluindo operações de formatação, análise ou transformação e visualização em gráficos. Há também um processo de armazenamento de dados. Os nós de depuração em diferentes pontos do fluxo são pontos de verificação e monitoramento do processo. Esta estrutura é típica de sistemas de monitoramento e análise em tempo real em aplicações IoT, permitindo a coleta, processamento e visualização de dados.

O armazenamento local, representado na Figura 13 como parte da camada de serviço, é responsável pela persistência de dados, armazenando as informações coletadas pelos sensores para análises futuras. Nesta proposta, o armazenamento local foi implementado utilizando arquivos no formato csv, que são gerados e salvos no mesmo computador local onde está instalado o Node-RED. O processo de geração do arquivo csv ocorre a partir da recepção dos dados dos sensores via MQTT, inserindo informações de data e hora correspondente à leitura e formata os dados em um padrão estruturado. Em seguida, essas informações são acrescentadas ao mesmo arquivo csv, permitindo a construção de um histórico contínuo sem necessidade de criar múltiplos arquivos individuais. O uso de arquivos csv traz algumas facilidades

importantes, como a simplicidade na criação e leitura dos arquivos, a compatibilidade com diversas ferramentas de análise de dados e a facilidade de manipulação em diferentes sistemas operacionais. Além de garantir a persistência de dados, o armazenamento local tem a função de redundância, atuando como um backup local das informações coletadas, podendo ser lidos por bancos de dados e transformados em informações úteis.

A camada de aplicação na topologia IoT apresentada na Figura 13 consiste no *dashboard* implementado via Node-RED, que obtém dados a partir de comunicação direta com o *broker*, desempenhando um papel essencial na visualização e interpretação dos dados coletados pelos sensores. Esta camada transforma dados brutos em representações visuais intuitivas, facilitando o monitoramento em tempo real e a tomada de decisões estratégicas. O *dashboard* é projetado para ser flexível e adaptável, permitindo que os gestores personalizem as métricas monitoradas, configurem alertas automáticos e realizem análises históricas e preditivas, enriquecendo a funcionalidade do sistema.

O Node-RED, utilizado para a construção do *dashboard*, foi executado na versão 3.0.2, sendo *node-red-dashboard* empregado para a visualização dos dados, que é um *plugin* nativo e *open-source* do Node-RED, dispensando a necessidade de integração com plataformas externas. A interface gráfica do *dashboard* é acessada diretamente por meio de navegadores web, sem a necessidade de instalação adicional em dispositivos cliente, garantindo acesso remoto e mobilidade para o gestor. No entanto, é importante destacar que o acesso ao *dashboard* é possível desde que o gestor esteja conectado à mesma rede local em que o *gateway* está operando, assegurando uma comunicação segura e eficiente dentro do ambiente industrial. Para a execução do Node-RED e do *dashboard*, foi utilizado um computador local com sistema operacional Windows 10, atendendo aos seguintes requisitos mínimos de hardware: processador de 1 GHz ou mais rápido, 1 GB de RAM para sistema de 32 bits ou 2 GB de RAM para sistema de 64 bits, e 16 GB de espaço em disco rígido para sistema de 32 bits ou 20 GB para sistema de 64 bits. Esses requisitos garantem o desempenho adequado para a execução do Node-RED e a atualização contínua do *dashboard* em tempo real.

A Figura 17 ilustra o *dashboard* do Gestor, apresentando as visualizações em formato de *gauge* na parte superior, para exibir os valores atuais das variáveis monitoradas, e um gráfico de linha na parte inferior, mostrando a tendência das três grandezas escolhidas para a PoC (corrente elétrica, temperatura e umidade) ao longo do tempo.

Figura 17 – *Dashboard* da aplicação



Fonte: Próprio autor (2023).

Desta forma, o Gestor pode visualizar em tempo real, através de uma *dashboard*, os dados coletados e para uma posterior análise e tomada de decisão, os dados também são armazenados localmente.

Esta arquitetura em camadas permite uma separação clara de responsabilidades, facilitando a escalabilidade, a manutenção e a evolução do sistema conforme as necessidades industriais. A utilização de protocolos padronizados, como o MQTT, e de tecnologias acessíveis, como NodeMCU e Node-RED, demonstra uma abordagem moderna, flexível e interoperável, alinhada aos princípios da I4.0.

A viabilidade econômica da PoC desenvolvida reforça sua aplicabilidade para PMEs, considerando a acessibilidade dos componentes e o custo reduzido de implementação. Os materiais utilizados, incluindo sensores, módulo NodeMCU e demais componentes eletrônicos, totalizam aproximadamente R\$ 100,00, representando um investimento inicial acessível para a adaptação de máquinas legadas.

Além dos custos com hardware, o desenvolvimento da solução envolveu esforços relacionados à programação do software, desenvolvimento do hardware e comissionamento do sistema. Dessa forma, o custo total estimado para a implementação inicial da PoC, somando os materiais e a mão de obra especializada, é de R\$ 600,00. Esse valor se mostra competitivo em comparação com soluções comerciais de monitoramento industrial, que frequentemente exigem investimentos significativamente superiores devido à necessidade de equipamentos proprietários e licenciamento de software.

Em relação as tecnologias adotadas são, em sua maioria, gratuitas ou possuem modelos de uso livre para aplicações de pequena e média escala. O Node-RED é gratuito e de código aberto, sem limitações quanto ao número de conexões locais. Já o *broker* MQTT HiveMQ,

utilizado na nuvem, oferece uma versão gratuita, mas limitada a um número máximo de 100 conexões simultâneas, sendo necessário um plano pago para escalas maiores. Essa combinação de tecnologias acessíveis torna a proposta viável para PMEs, que podem implementar sistemas de monitoramento digital com investimentos reduzidos, escalando conforme a demanda. Assim, a PoC demonstrou não apenas a viabilidade técnica da integração de máquinas legadas à IIoT, mas também sua viabilidade econômica, tornando-se uma alternativa acessível e escalável para a digitalização da indústria de pequeno e médio porte.

4.4.2 Construir

Na etapa de Construção, o desenvolvimento de hardware e software ocorreu de maneira paralela e integrada, com o objetivo de implementar um sistema de monitoramento para a PoC.

Em relação ao hardware, foi utilizada a plataforma de prototipagem NodeMCU, que incorpora o microcontrolador ESP8266 e oferece conectividade Wi-Fi integrada, tornando-se ideal para aplicações de IoT.

Para integrar o sensor de corrente não invasivo SCT-013, foi necessário o desenvolvimento de uma interface de entrada de sinais. Essa interface foi projetada utilizando o Proteus Design Suite versão 8.5, um software amplamente utilizado para captura esquemática, simulação de circuitos e design de placas de circuito impresso (PCI).

O NodeMCU realiza a leitura de sinais analógicos em seu pino de entrada A0, que opera com um range de tensão entre 0 V e 3,3 V. Como o sensor SCT-013 gera um sinal de corrente alternada proporcional à corrente medida, foi necessário projetar um circuito condicionador de sinal, que converte o sinal de corrente alternada em um sinal de tensão contínua, ajustado para ser lido pelo NodeMCU. O esquema elétrico detalhado do circuito condicionador pode ser encontrado no Apêndice A, e o layout da PCI correspondente está disponível no Apêndice C. Para reduzir custos e tempo de desenvolvimento, priorizou-se o uso de componentes existentes e de fácil obtenção.

Além do sensor de corrente, o sistema também integra o sensor de umidade e temperatura, o DHT11, que se comunica com o NodeMCU por meio de uma comunicação serial digital com quadro de 40 bits. O DHT11 mede temperatura em graus Celsius e umidade relativa do ar, enviando os dados como uma série de pulsos digitais que são interpretados pelo *firmware* do NodeMCU.

Vale destacar que, dependendo dos sensores escolhidos, pode ser necessário desenvolver interfaces de entrada específicas, ajustando os tipos de sinais elétricos e seus níveis de tensão para garantir compatibilidade com as entradas do microcontrolador.

Quanto ao sistema de alimentação, o NodeMCU requer uma tensão de alimentação (V_{cc}) de 3,3 V a 5 V, com uma corrente mínima de 500 mA, para garantir um funcionamento estável do módulo e dos sensores conectados. O sistema pode ser alimentado por uma porta USB de um computador ou por uma fonte externa, desde que respeitados os limites de tensão e corrente necessários.

Já para o desenvolvimento do software utilizou-se a *Integrated Development Environment* (IDE) Arduino, na versão 1.8.19, um ambiente de desenvolvimento integrado usado para escrever e gravar programas em placas compatíveis com Arduino. O fluxograma do *firmware* responsável pelo processamento encontra-se no apêndice B.

O resultado foi uma PoC funcional que demonstra o conceito, mas não um produto final completo.

4.4.3 Avaliar

A avaliação da PoC foi realizada em duas frentes principais, garantindo uma abordagem abrangente para validar tanto os aspectos técnicos quanto práticos do sistema:

- **Validação em Laboratório:** inicialmente, todo o software foi simulado através de estímulos controlados nas variáveis do sistema. Esta etapa permitiu testar a capacidade de detecção e resposta do sistema em um ambiente controlado; após a validação do software, procedeu-se com testes funcionais do hardware. Cada sensor foi testado individualmente. A conectividade com a rede local foi testada, simulando diferentes condições de rede, como: variações na intensidade do sinal Wi-Fi, intermitência na conexão e mudanças de endereço IP, para assegurar a comunicação e foram realizados testes de integração entre hardware e software para verificar o funcionamento do sistema.
- **Implementação da PoC:** após a validação bem-sucedida em laboratório, a PoC foi implementada em um ambiente real. A instalação foi realizada em uma máquina específica, escolhida para representar as condições típicas de um ambiente industrial. Esta fase permitiu avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação, expostas a variáveis não controladas como flutuações de temperatura, umidade e interferências. A Tabela 3 mostra um recorte dos dados coletados em 10/07/24.

Tabela 3 – Dados coletados da PoC

Data	Hora	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Corrente (A)
10/07/2024	20:04:06	22,8	75,4	13,2
10/07/2024	20:04:08	22,8	75,4	11,6
10/07/2024	20:04:10	22,8	75,4	14,4
10/07/2024	20:04:12	22,8	75,4	11,2
10/07/2024	20:04:14	22,8	75,4	14,2
10/07/2024	20:04:16	22,8	75,4	11,3
10/07/2024	20:04:18	22,8	75,4	14,1
10/07/2024	20:04:20	22,8	75,4	13,6
10/07/2024	20:04:22	22,8	75,4	13,9

Fonte: Próprio autor (2024).

A variação da corrente elétrica apresentada na Tabela 3 ocorre em função das demandas do processo de usinagem, sobretudo nos momentos em que a ferramenta entra em contato com a peça em operação. Esse comportamento é esperado, já que diferentes condições, como a dureza do material, a profundidade de corte e o avanço da ferramenta, influenciam diretamente o esforço exigido do motor. Assim, os picos de corrente indicam momentos de maior esforço mecânico, enquanto as quedas refletem períodos de menor resistência, como nos intervalos entre cortes ou quando a ferramenta se desloca sem carga significativa.

Durante esta fase, também foi possível coletar feedback da Coordenação, proporcionando uma compreensão sobre a viabilidade, adequação e alinhamento com as definições do problema, a usabilidade e eficácia prática do sistema.

4.4.4 Aprender

Na etapa de Aprendizagem, as lições obtidas da avaliação foram analisadas para orientar futuras iterações do projeto. As principais lições incluem:

- A eficácia do sistema em detectar as variáveis em tempo real e monitorá-las através de um *dashboard*.
- Devido a dificuldades de conectividade do NodeMCU, causadas pelo baixo nível do sinal Wi-Fi, foi necessário um remanejamento do Access Point Wireless para uma região próxima à máquina em estudo.
- Restrições de segurança na infraestrutura de rede de internet não permitiram a conectividade com o *broker* HiveMQ, que utiliza a porta 1883 como padrão MQTT. Como solução foi implementada uma nova rede destinada apenas para as aplicações IoT.

- Topologia do circuito utilizada foi concebida apenas para validação da PoC, com as premissas da metodologia PoC Design, onde um protótipo ou uma versão em pequena escala do projeto de IoT demonstra sua viabilidade técnica. Desta forma sinais adicionais, digitais ou analógicos, não podem ser acrescentados na atual topologia e um novo projeto é necessário.

Essas lições aprendidas serão aplicadas em futuras iterações do projeto e em outros projetos IoT, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e alinhadas com as necessidades do mercado.

Além das dificuldades técnicas e operacionais superadas durante a implementação da PoC, a experiência também possibilitou a diminuição de barreiras mais amplas associadas à adoção da I4.0 por PMEs. Entre os desafios enfrentados, destacam-se os custos iniciais elevados, a falta de conhecimento técnico, as interrupções na produção, as mudanças nos processos de trabalho e os riscos de segurança cibernética.

Para contornar a barreira dos custos iniciais elevados, a abordagem adotada priorizou tecnologias acessíveis, como sensores de baixo custo e plataformas de código aberto, demonstrando que a conectividade de máquinas legadas pode ser viável mesmo para empresas com restrições orçamentárias. A utilização do NodeMCU, de sensores de baixo custo e de um ambiente de processamento baseado no Node-RED permitiu reduzir significativamente os investimentos necessários para viabilizar o monitoramento remoto de equipamentos industriais.

A falta de conhecimento e habilidades técnicas foi superada por meio de um processo contínuo de aprendizado e adaptação, com a exploração de documentos técnicos consolidados, adquirindo experiência prática na configuração de dispositivos IoT e na integração de dados industriais. Essa abordagem reforça a necessidade de capacitação progressiva para que as PMEs possam internalizar as competências essenciais para a transformação digital.

No que se refere às interrupções na produção, a implementação foi planejada para evitar qualquer parada na operação, pois os dados da máquina foram coletados sem a necessidade de interromper o funcionamento. Isso foi possível graças ao uso de sensores não invasivos, como o sensor SCT-013, que permitem o monitoramento contínuo dos equipamentos sem interferir diretamente nos processos produtivos. Esse planejamento garantiu que a máquina analisada operasse normalmente durante a coleta de dados, demonstrando que soluções de IIoT podem ser introduzidas sem comprometer a continuidade das operações.

As mudanças nos processos de trabalho também representaram um desafio, visto que a digitalização implica na adoção de novas práticas de monitoramento e análise de dados. Para

reduzir essa barreira, a PoC foi estruturada de maneira intuitiva, com *dashboards* que facilitam a interpretação das informações coletadas.

Por fim, os riscos de segurança cibernética foram endereçados por meio da segregação de redes, com a criação de uma infraestrutura dedicada às aplicações IoT. Essa estratégia minimizou a exposição dos sistemas industriais a potenciais ameaças externas, garantindo que a conectividade pudesse ser implementada sem comprometer a integridade da infraestrutura digital da empresa.

A experiência adquirida com a implementação da PoC demonstra que, embora a adoção da IIoT apresente desafios para as PMEs, é possível superá-los por meio de abordagens estratégicas que considerem a realidade dessas empresas. A redução das barreiras identificadas reforça o potencial de expansão da solução proposta, contribuindo para a modernização gradual dos processos produtivos e facilitando a transição para um ambiente mais digitalizado e eficiente.

A implementação da PoC baseada nessa arquitetura em camadas demonstra a viabilidade técnica e econômica da conectividade de máquinas legadas em PMEs, alinhando-se aos princípios da I4.0. A adoção de tecnologias acessíveis e protocolos padronizados favorece a escalabilidade e a flexibilidade do sistema, permitindo que as empresas evoluam gradualmente para um ambiente produtivo mais digitalizado e eficiente.

4.5 Premissas e Delimitações do Projeto

Com base nos benefícios e barreiras apresentados nos Quadros 2 e 3, e ao comparativo da infraestrutura IoT apresentado no Quadro D.1 no Apêndice D, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem estratégica para a adoção da I4.0 pelas PMEs, particularmente no que diz respeito à conectividade de máquinas legadas. A PoC apresentada na seção 4.4 demonstrou a viabilidade técnica e econômica de integrar tecnologias IIoT em equipamentos legados, evidenciando as vantagens e ao mesmo tempo em que expôs desafios. Para superar esses obstáculos e maximizar os benefícios, são recomendadas as seguintes ações: definição de um projeto piloto, projeção da arquitetura IIoT, identificação de dados relevantes para o sensoriamento, implementação da coleta e processamento de dados, geração de informações e conhecimento, integração com sistemas de gestão da produção, escalonamento gradual, capacitação da equipe, garantia de segurança cibernética, além da medição e otimização contínuas. O Quadro 5 apresenta essas recomendações de forma detalhada.

Quadro 5 – Recomendações para implementação de IIoT em PMEs

Recomendação	Descrição
Definir um projeto piloto	Identifique uma máquina ou processo crítico para conectividade. Escolha um equipamento com impacto significativo na produção e qualidade. Considere facilidade de implementação e potencial retorno sobre investimento.
Projetar a arquitetura IIoT	Defina uma arquitetura de rede para conectividade de máquinas legadas. Escolha protocolos de comunicação adequados. Implemente <i>gateways</i> para conectar máquinas legadas à rede.
Identificar dados relevantes para sensoriamento	Determine parâmetros críticos do processo que afetam qualidade e eficiência. Identifique pontos de coleta de dados nas máquinas legadas. Selecione sensores apropriados para capturar os dados necessários.
Implementar coleta e processamento de dados	Instale sensores e configure a coleta de dados. Implemente sistemas de armazenamento de dados. Desenvolva algoritmos para processamento e análise em tempo real.
Gerar informações e conhecimento	Crie <i>dashboards</i> para monitoramento em tempo real. Implemente análises preditivas para manutenção e otimização. Desenvolva sistemas de alerta para anomalias.
Integrar com sistemas de gestão da produção	Conecte os dados aos sistemas MES ou ERP existentes. Implemente indicadores baseados nos dados coletados. Crie relatórios automatizados para suporte à decisão.
Escalar gradualmente	Avalie os resultados do projeto piloto e faça ajustes. Identifique outras máquinas ou processos para expandir. Desenvolva um plano de longo prazo para conectar toda a fábrica.
Capacitar a equipe	Treine operadores e engenheiros no uso das novas ferramentas. Desenvolva habilidades em análise de dados e manutenção preditiva. Fomente uma cultura de decisão baseada em dados.
Garantir a segurança cibernética	Implemente medidas de segurança para dados e sistemas. Realize avaliações regulares de vulnerabilidade. Desenvolva políticas de segurança e treine os funcionários.
Medir e otimizar continuamente	Estabeleça métricas para avaliar o impacto na gestão da produção. Realize revisões periódicas para identificar melhorias. Mantenha-se atualizado com novas tecnologias e práticas da I4.0.

Fonte: Próprio autor (2023).

A implementação bem-sucedida da IIoT nas PMEs exige uma abordagem estruturada, que leve em conta as especificidades de cada ambiente produtivo e das máquinas legadas. As

recomendações descritas no Quadro 5 funcionam como um guia prático para essa jornada, destacando etapas vitais, como a definição de um projeto piloto, a projeção da arquitetura IIoT e a coleta e processamento de dados em tempo real. Seguir essas diretrizes pode auxiliar as PMEs em uma transição mais suave para a I4.0, melhorando a eficiência operacional e reduzindo custos, enquanto superam barreiras como a falta de recursos e a resistência às mudanças.

O desenvolvimento de um sistema IIoT para monitoramento de tornos universais, objeto de estudo na PoC, exige uma abordagem que considere as particularidades das máquinas legadas, os desafios operacionais das PMEs e os benefícios advindos da automação e da manutenção preditiva. Dessa forma, as premissas e delimitações devem guiar a implementação de um projeto IIoT que assegure a adoção de tecnologias economicamente viáveis para as PMEs, sem comprometer o funcionamento atual das máquinas.

Com esta abordagem equilibrada entre conectividade, automação e custo-benefício, as premissas do projeto oferecem um caminho estruturado para a modernização das operações, sem prejudicar a viabilidade econômica. A seguir, são apresentadas as premissas do projeto:

- **Conectividade de Máquinas Legadas:** A principal premissa é que o sistema de monitoramento IIoT deve ser projetado para funcionar em máquinas legadas, ou seja, máquinas que não foram originalmente projetadas para se conectar à internet. Para isso, a implementação de sensores externos, como os de vibração, força e temperatura, permitirá a coleta de dados essenciais sem a necessidade de grandes modificações nas máquinas existentes. Esses sensores poderão ser conectados de forma não intrusiva, garantindo que a estrutura original das máquinas seja preservada.
- **Seleção de Parâmetros Críticos:** O projeto deve focar em parâmetros de monitoramento que impactam diretamente a eficiência e qualidade do processo. Como parâmetros de produção: ritmo de produção, total de peças produzidas etc.; parâmetros de processo: tempos de ciclo, tempos de corte etc.; parâmetros de máquina: estado da máquina, estado de segurança etc. A coleta e análise desses parâmetros permitirá otimizar a operação e melhorar a qualidade dos produtos.
- **Automação e Tomada de Decisão Baseada em Dados:** A automação é uma premissa fundamental deste projeto. Através do uso de dados para manutenção preditiva e painéis de controle em tempo real, o sistema será capaz de detectar

anomalias no processo. Isso resultará em maior eficiência, reduzindo o tempo de inatividade das máquinas e aumentando a produtividade.

- **Custos de Implementação Controlados:** Para garantir a viabilidade do projeto para PMEs, é fundamental que os sensores e tecnologias escolhidas ofereçam um bom custo-benefício. A implementação deve ser escalonável, permitindo que o sistema possa ser expandido conforme a empresa se adapta à tecnologia e os resultados do projeto se mostrem positivos.
- **Capacitação e Infraestrutura Técnica:** A equipe envolvida no projeto deve ser capacitada para operar e interpretar os dados fornecidos pelos sensores. Além disso, a infraestrutura técnica necessária, como redes locais dedicadas e sistemas de armazenamento de dados, deve ser dimensionada adequadamente para suportar o aumento do volume de dados coletados pelos sensores.

Para garantir a viabilidade e o sucesso da implementação do sistema IIoT em tornos universais, é necessário estabelecer delimitações claras que definam os limites e o escopo do projeto. Essas delimitações ajudam a orientar o desenvolvimento ao considerar as restrições técnicas, financeiras e operacionais das PMEs. Além disso, elas asseguram que o projeto seja implementado de forma gradual e sustentável, evitando interrupções significativas nas operações e maximizando o retorno sobre o investimento. A seguir, são apresentadas as delimitações do projeto:

- **Integração Gradual:** O projeto será implementado de maneira gradual, começando com um piloto. Com base nos resultados desse piloto, a expansão para outras máquinas será feita de maneira progressiva, ajustando-se conforme as necessidades de cada equipamento e processo. Isso garantirá que eventuais problemas técnicos possam ser resolvidos sem comprometer o funcionamento global da operação.
- **Infraestrutura de Rede Limitada:** A conectividade será um desafio, especialmente em fábricas que possuem infraestrutura de rede deficiente. Por isso, a implementação de redes locais dedicadas para suportar o IIoT pode ser necessária para garantir a estabilidade na transmissão de dados coletados pelos sensores.
- **Escalabilidade e Sustentabilidade:** A solução proposta deve ser escalável, permitindo a adição de novos sensores e a integração de novas máquinas conforme o projeto progride. Além disso, o sistema precisa ser sustentável em

termos de custos operacionais, garantindo que a economia proporcionada pela automação e manutenção preditiva seja suficiente para cobrir os investimentos iniciais.

Com as premissas e delimitações estabelecidas, é possível definir as soluções técnicas que permitirão o monitoramento eficiente dos tornos universais por meio da tecnologia IIoT.

4.6 Aplicação futura

A aplicação da IIoT na I4.0 apresenta um caminho promissor para aumentar a eficiência, o desempenho e a qualidade nas PMEs. A Figura 18 ilustra o OEE, o indicador mais utilizado pela indústria para gerenciar a efetividade global dos equipamentos em linhas de produção, demonstrando como a coleta e análise de dados fornecem uma visão valiosa para melhorias contínuas.

Figura 18 – OEE *dashboard*



Fonte: Próprio autor (2023).

A IIoT permite a conexão e monitoramento em tempo real de máquinas legadas, que, de outra forma, estariam isoladas, sendo um fator decisivo para melhorar a disponibilidade dos equipamentos. No *dashboard* da Figura 18, a disponibilidade está em 80%, indicando que há margem para melhorias, pois ocorreu uma perda de 20% da disponibilidade, possivelmente por falhas, *setups* ou paradas inesperadas. Propõe-se a utilização de um sensor de fim de curso, posicionado na torre porta-ferramenta, para detectar o início e término de uma operação, e um sensor de corrente para monitorar o consumo de energia do motor, confirmando a operação da

máquina. Com a combinação desses sensores, o tempo de operação seria registrado apenas quando ambos estivessem ativos, garantindo que o tempo efetivo de trabalho seja contabilizado no cálculo da disponibilidade do OEE. Essa combinação de sensores permitiria não apenas registrar o tempo de operação, mas também discretizar os tempos produtivos em duas categorias importantes: tempo de avanço (quando a ferramenta se move até a peça) e tempo efetivo de corte (quando a ferramenta realiza o corte propriamente dito).

A integração de sistemas IIoT também facilita a coleta de dados sobre o desempenho das máquinas, como taxas de produção e tempos de ciclo. Na Figura 18, o desempenho está em 90%, e a análise de dados em tempo real pode identificar gargalos e permitir ajustes rápidos. Para monitorar essa métrica, sugere-se o uso de sensores de proximidade para contagem de peças boas e reprovadas após inspeção. A produção real é a soma das peças boas e reprovadas, enquanto a produção teórica é inserida manualmente pelo operador. Isso assegura simplicidade e precisão no cálculo do desempenho.

O monitoramento contínuo da qualidade da produção por sistemas IIoT também ajuda a detectar defeitos e variações no processo. Na Figura 18, a qualidade está em 80%, e a IIoT pode reduzir defeitos por meio da análise de dados em tempo real. Propõe-se a utilização de sensores de proximidade: um no magazine, para contar as peças boas, e outro na caixa de rejeição, onde são descartadas as peças reprovadas. A qualidade é calculada pela relação entre o número de peças boas e o total de peças processadas, permitindo um monitoramento preciso e contínuo.

A coleta e análise de dados em tempo real proporcionada pela IIoT contribuem para uma melhor tomada de decisão. No *dashboard* da Figura 18, o OEE geral está em 57,6%, demonstrando um potencial significativo de melhorias com a otimização baseada em dados. *Dashboards* como o apresentado permitem visualizar rapidamente a eficiência operacional e tomar decisões mais assertivas, destacando a importância da visualização de dados para a melhoria contínua e a gestão eficaz de produção.

Para garantir uma aplicação eficaz do sistema IIoT no monitoramento de tornos universais, é essencial definir claramente os aspectos a serem monitorados, os sensores mais adequados e o tipo de informação relevante a ser coletada. Nesse contexto, o Quadro 6 apresenta uma síntese detalhada das informações categorizadas em produção, processo e eventos da máquina, destacando os dados coletados, os tipos de sensores recomendados e suas respectivas funções. Vale destacar que os sensores recomendados são componentes eletrônicos e que circuitos de condicionamento de sinal devem ser projetados e construídos. Essa abordagem busca

viabilizar a integração de máquinas legadas ao ambiente da I4.0, promovendo uma gestão mais eficiente e a otimização dos processos produtivos.

Quadro 6 – Parâmetros Monitorados e Soluções IIoT

Categoria da Informação	Tipo de informação	Dado coletado	Sensores Recomendados
Produção	Ritmo de produção	Tempo de início e fim de cada ciclo de usinagem	Sensor de tempo/RTC integrado ao NodeMCU
	Total de peças produzidas, rejeitadas e retrabalhadas	Contagem de peças boas, rejeitadas e retrabalhadas por período	Contadores de peças, sensores ópticos
	Eventos de paradas	Registro de início, fim e motivo das paradas	Sensores de fim de curso associados a botões
	Tempo efetivo de produção	Tempo total de operação descontando períodos de inatividade	Sensor de tempo/RTC integrado ao NodeMCU associados a sensores de corrente Beijing Yaohuadechang Electronic/SCT013
	Rastreabilidade de ordem de produção	Identificação única de cada peça ou lote, associada à ordem de produção	Sistemas RFID ou códigos de barras
Processo	Tempos de ciclo	Duração total de cada ciclo de usinagem, desde o início até o fim	Sensor de tempo/RTC integrado ao NodeMCU
	Tempos de corte	Tempo específico em que a ferramenta está em contato com a peça realizando o corte	Sensores de vibração Analog Devices/ADXL345 ou sensores acústicos Knowles/SPU0410LR5H-QB
	Velocidades e avanços reais	Velocidade real do eixo principal (rpm) e avanço da ferramenta (mm/min)	Sensor de rotação Hall Allegro MicroSystems/A3144
	Consumo de potências de eixos	Medição da corrente elétrica consumida pelos motores dos eixos durante a operação	Sensor de corrente Beijing Yaohuadechang Electronic/SCT013
	Condições de ferramentas e de processo	Temperatura da ferramenta, níveis de vibração, desgaste e integridade da ferramenta durante o processo	Sensores de temperatura termopar tipo K, sensores de vibração Analog Devices/ADXL345
Eventos de Máquina	Estado da máquina	Visualização da condição da máquina: em ciclo, parada ou alarme	Sistemas de monitoramento digital integrado a <i>Dashboard</i>
	Frequência de ocorrências	Número de vezes que cada tipo de estado ocorreu em um período determinado	<i>Dashboard</i> e registros das ocorrências
	Estado de segurança	Monitoramento de proteções e dispositivos de segurança	Sensores de posição ou relés de segurança
	Desgaste dos rolamentos	Análise de vibrações	Sensor de vibração Analog Devices/ADXL345

Fonte: Próprio autor (2024).

A categoria Produção apresentada no Quadro 6 detalha aspectos fundamentais para o monitoramento da eficiência e da produtividade no contexto da integração de IIoT em tornos universais. Cada linha do quadro é explicada a seguir:

- Ritmo de produção: O registro do tempo de início e término de cada ciclo de usinagem é essencial para medir o ritmo de produção. Por meio do sensor de tempo (RTC – *Real Time Clock*) integrado ao NodeMCU, é possível acompanhar precisamente cada etapa do processo produtivo, contribuindo para a análise da eficiência operacional e identificação de gargalos.
- Total de peças produzidas, rejeitadas e retrabalhadas: A contagem de peças boas, rejeitadas e retrabalhadas fornece dados indispensáveis para o controle da qualidade e a identificação de desvios no processo. Para isso, contadores de peças e sensores ópticos são utilizados, permitindo rastrear a produção em tempo real.
- Eventos de paradas: O registro dos períodos de inatividade e os motivos das paradas é realizado com sensores de fim de curso associados a botões. Essa coleta de dados facilita a identificação de interrupções no processo produtivo, auxiliando na implementação de medidas corretivas e preventivas.
- Tempo efetivo de produção: O cálculo do tempo total de operação, descontando os períodos de inatividade, permite uma visão clara da utilização dos recursos produtivos. A combinação do sensor de tempo (RTC) e dos sensores de corrente assegura a precisão desses dados, otimizando a análise de desempenho.
- Rastreabilidade de ordem de produção: A identificação única de cada peça ou lote, associada à ordem de produção, é essencial para garantir a rastreabilidade ao longo da cadeia produtiva. Tecnologias como sistemas RFID ou códigos de barras são empregadas para esse propósito, oferecendo confiabilidade e integração aos sistemas de gestão.

A categoria Processo no Quadro 6 aborda os parâmetros críticos relacionados à operação do torno universal, permitindo uma análise detalhada e em tempo real do desempenho e da qualidade do processo de usinagem. A seguir, detalham-se cada uma das linhas apresentadas no quadro:

- Tempos de ciclo: A duração total de cada ciclo de usinagem, desde o início até o fim, é registrada com precisão utilizando o sensor de tempo (RTC) integrado

ao NodeMCU. Esse dado é fundamental para avaliar a eficiência do processo e identificar oportunidades de redução de tempo ocioso.

- **Tempos de corte:** O monitoramento do tempo específico em que a ferramenta está efetivamente em contato com a peça é realizado por sensores de vibração ou sensores acústicos. Esse dado é essencial para otimizar o processo de corte, garantindo eficiência no uso da ferramenta e qualidade do produto final.
- **Velocidades e avanços reais:** A medição da velocidade real do eixo principal (em rotações por minuto) e do avanço da ferramenta (em milímetros por minuto) é feita por tacômetros ou sensores de rotação, como sensores ópticos ou de efeito Hall. Esses dados asseguram que o torno opere dentro dos parâmetros ideais, prevenindo falhas e desgaste prematuro das ferramentas.
- **Consumo de potências de eixos:** A medição da corrente elétrica consumida pelos motores dos eixos durante a operação é realizada por sensores de corrente. Essa informação é valiosa para otimizar o uso de energia e identificar possíveis sobrecargas ou falhas nos motores.
- **Condições de ferramentas e de processo:** O monitoramento da temperatura da ferramenta, níveis de vibração, desgaste e integridade durante o processo é realizado com sensores específicos, como sensores de temperatura e sensores de vibração. Esses dados ajudam a prevenir falhas no processo, melhorar a consistência do produto e aumentar a vida útil das ferramentas.

A categoria Eventos de Máquina detalha informações relacionadas ao estado operacional do torno universal, permitindo monitorar condições específicas que influenciam diretamente a eficiência e a segurança do processo produtivo. A seguir, cada linha do Quadro 6 é explicada:

- **Estado da máquina:** A visualização das condições operacionais da máquina, como em ciclo, parada ou alarme, é importante para acompanhar o funcionamento em tempo real. Isso é viabilizado por sinais digitais integrados a *dashboards*, que facilitam a tomada de decisões rápidas em caso de falhas ou interrupções.
- **Frequência de ocorrências:** O registro do número de vezes que cada tipo de estado ocorre em um período determinado é essencial para identificar padrões e tendências operacionais. Os dados coletados por meio do *dashboard* e registros automatizados ajudam a planejar manutenções e otimizar os processos.

- Estado de segurança: O monitoramento de proteções e dispositivos de segurança da máquina é realizado por sensores de posição ou relés de segurança. Esses dispositivos garantem a operação segura, prevenindo acidentes e assegurando a conformidade com normas regulamentadoras.
- Desgaste dos rolamentos: A análise das vibrações geradas pelos rolamentos é feita com sensores de vibração. Esses dados são fundamentais para detectar sinais de desgaste precoce, possibilitando a substituição ou reparo antes que a falha comprometa a produção.

A integração de sistemas IIoT em máquinas legadas, como demonstrado nesta seção, permite monitorar categorias: da produção, do processo e eventos de máquina, além de ser possível acompanhar métricas como o OEE. Ao conectar máquinas legadas ao ambiente digital, as PMEs podem alinhar suas operações aos princípios da I4.0, aumentando a competitividade e promovendo uma gestão produtiva mais inteligente e sustentável.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação investigou os desafios e oportunidades da integração de tecnologias da I4.0 em PMEs, com foco especial na conectividade de máquinas legadas por meio da IIoT. A pesquisa foi estruturada em três etapas complementares: uma RSL seguindo a metodologia PRISMA, a análise de dados secundários coletados de 246 executivos latino-americanos e o desenvolvimento de uma PoC. A partir desses procedimentos, foi possível obter uma visão abrangente sobre as potencialidades e limitações do uso de tecnologias digitais para a modernização de maquinários antigos, oferecendo subsídios tanto teóricos quanto práticos para a adoção da I4.0 em ambientes produtivos.

Os resultados da RSL destacaram que a adoção de tecnologias da I4.0 oferece benefícios substanciais para as PMEs, incluindo aumento de eficiência e produtividade, redução de custos e melhoria na tomada de decisão. No entanto, a pesquisa também revelou uma série de barreiras significativas, como altos custos de implementação, resistência cultural à mudança, desafios de segurança cibernética e a necessidade de capacitação contínua dos profissionais. A análise dos dados secundários confirmou que, embora essas barreiras sejam comuns em diversos contextos, elas se manifestam com maior intensidade em países latino-americanos, onde as PMEs enfrentam limitações financeiras e estruturais mais acentuadas em comparação com empresas de regiões mais industrializadas.

A implementação da PoC comprovou a viabilidade técnica de conectar máquinas legadas por meio da IIoT, demonstrando como essas tecnologias podem ser aplicadas para o monitoramento em tempo real e a otimização de processos produtivos. A utilização de sensores no torno universal Tormax 30, fabricado em 2007, permitiu acompanhar o desempenho da máquina e identificar padrões de uso, validando o potencial da IIoT para aprimorar a gestão da produção e possibilitar a adoção de práticas preditivas de manutenção. Esses achados são particularmente relevantes para as PMEs, uma vez que mostram que é possível modernizar maquinários antigos sem a necessidade de substituição integral, o que oferece uma alternativa mais acessível e estratégica para a transformação digital.

Ao longo do desenvolvimento, priorizou-se o uso de tecnologias acessíveis e amplamente documentadas, como o NodeMCU (ESP8266) e protocolos MQTT, os quais foram articulados com arquiteturas de baixo custo. Essas escolhas, além de proporcionarem soluções financeiramente viáveis, também aproveitam a infraestrutura já existente nas PMEs, minimizando a necessidade de investimentos adicionais significativos. O uso de dispositivos

simples, mas eficazes, reforça o caráter acessível da proposta e a sua compatibilidade com o perfil técnico das empresas menores.

Adicionalmente, a dissertação abordou a relevância de distinguir os sinais coletados daqueles utilizados para intertravamento ou segurança das máquinas. Essa abordagem garante que os dados obtidos para análise e gestão não comprometam a operação das máquinas ou aumentem os riscos de parada não programada. Assim, reforça-se a utilização segura e eficiente das tecnologias propostas, alinhando-se às boas práticas de gestão operacional e de manutenção.

A construção de *dashboards* para visualização em tempo real reforça a aplicação prática da PoC, permitindo análises que subsidiam decisões gerenciais. Os dados coletados, como disponibilidade, desempenho e qualidade, são importantes para identificar oportunidades de melhoria e aumentar a competitividade das PMEs. Essa abordagem evita a necessidade de plataformas robustas e caras, ao mesmo tempo em que fornece informações relevantes para a gestão da produção.

Embora as soluções comerciais sejam adequadas para grandes empresas com orçamentos maiores e exigências mais rigorosas, a PoC demonstrou ser uma alternativa prática para PMEs. Ela atende ao perfil técnico e financeiro dessas empresas, permitindo a coleta de dados essenciais para análise e decisão gerencial sem comprometer a viabilidade econômica do projeto. Essa abordagem destaca a importância de soluções sob medida para contextos específicos, valorizando a escalabilidade e a adaptabilidade.

A comparação entre a PoC desenvolvida e soluções comerciais robustas revela diferenças importantes. Soluções comerciais geralmente oferecem maior robustez, integração nativa com sistemas industriais e recursos avançados de segurança e manutenção. No entanto, essas características são acompanhadas de custos elevados e requerem infraestrutura avançada, o que pode ser inviável para muitas PMEs. Por outro lado, a PoC desenvolvida foca na simplicidade e acessibilidade, aproveitando a infraestrutura existente e garantindo que os sinais coletados não estejam relacionados ao intertravamento ou à segurança das máquinas, evitando riscos de parada ou comprometimento da operação.

Um aspecto crítico discutido ao longo do estudo foi a relevância de esclarecer o alinhamento entre as especificidades das PMEs e as tecnologias sugeridas. Para tanto, a dissertação incorporou um quadro que correlaciona sensores, dados coletados e informações geradas, apresentando uma visão integrada que pode servir de guia para outras implementações em PMEs.

Embora o trabalho tenha se concentrado em máquinas legadas, os resultados obtidos sugerem que a conectividade de tais equipamentos, utilizando tecnologias de baixo custo,

contribuiu significativamente para a transformação digital das PMEs. Essa abordagem não apenas promove a modernização de processos, mas também cria condições para que essas empresas possam competir em mercados globalizados.

Entretanto, a pesquisa deixou claro que a conectividade de máquinas legadas não é apenas uma questão tecnológica, mas envolve também aspectos culturais e gerenciais. A resistência à mudança, identificada tanto na literatura quanto nos dados secundários, reflete a dificuldade que muitas empresas têm em adotar novas práticas e abandonar processos consolidados. Superar essa resistência requer não apenas a capacitação técnica dos profissionais, mas também o engajamento da alta gestão e o desenvolvimento de uma cultura organizacional voltada para a inovação e a melhoria contínua. Nesse sentido, o investimento em treinamento e desenvolvimento é essencial para preparar os colaboradores para lidar com novas tecnologias e operar em um ambiente produtivo cada vez mais digitalizado e conectado.

Outro aspecto relevante identificado foi a importância da segurança cibernética na implementação de tecnologias IIoT. A crescente conectividade entre máquinas e sistemas digitais amplia a vulnerabilidade das empresas a ataques cibernéticos, o que pode comprometer tanto a integridade dos dados quanto a continuidade das operações. Assim, recomenda-se que as PMEs adotem uma abordagem proativa de segurança desde o início da implementação das tecnologias da I4.0, incorporando protocolos robustos de proteção e investindo em ferramentas de monitoramento e resposta a incidentes.

A partir dos resultados obtidos, é possível traçar algumas recomendações para facilitar a adoção da I4.0 em PMEs. Primeiramente, a implementação deve ser realizada de forma gradual, começando por projetos piloto que permitam avaliar o retorno sobre o investimento e fazer ajustes necessários antes da expansão para outras áreas da produção. A experiência com a PoC mostrou que esse tipo de abordagem é eficaz para atenuar riscos e demonstrar, de maneira prática, os benefícios das novas tecnologias. Além disso, é fundamental que as empresas desenvolvam um plano estratégico claro para a transformação digital, alinhando as iniciativas de inovação aos objetivos organizacionais e envolvendo todas as áreas da empresa nesse processo.

Por fim, a pesquisa revelou que, embora existam desafios significativos, a adoção da I4.0 nas PMEs é não apenas possível, mas também necessária para garantir sua competitividade no mercado global. A integração de máquinas legadas por meio da IIoT é uma solução prática e eficaz para empresas que desejam modernizar suas operações sem realizar grandes investimentos iniciais. No entanto, o sucesso dessa transformação depende de uma combinação de fatores tecnológicos, culturais e organizacionais. A implementação gradual, o treinamento

contínuo, a segurança cibernética e o engajamento da alta gestão são elementos fundamentais para garantir que a adoção das tecnologias da I4.0 traga os resultados esperados e contribua para o crescimento sustentável das PMEs.

De forma geral, esta pesquisa contribuiu para o campo de estudos sobre a transformação digital de PMEs, oferecendo uma análise detalhada dos benefícios e barreiras da adoção da I4.0 e propondo uma solução prática para a conectividade de máquinas legadas. A partir da experiência com a PoC, ficou evidente que a modernização dos processos produtivos por meio de tecnologias IIoT é uma alternativa viável e estratégica para as PMEs. No entanto, o sucesso dessa transformação depende de um conjunto integrado de ações que envolvem tanto a capacitação e o engajamento das pessoas quanto a implementação de tecnologias seguras e eficientes. A adoção da I4.0 pode não apenas aumentar a produtividade e a competitividade das PMEs, mas também abrir novas oportunidades para inovação e crescimento sustentável, aproximando essas empresas de um ambiente industrial moderno e preparado para os desafios do futuro.

5.1 Limitações do estudo

Embora este estudo tenha apresentado uma solução viável para conectar máquinas legadas às tecnologias da I4.0, há limitações que devem ser consideradas. Primeiramente, o protótipo foi testado em apenas uma máquina-ferramenta, o que restringe a generalização dos resultados para um cenário com múltiplas máquinas interconectadas. Além disso, os benefícios observados na revisão bibliográfica necessitam de validação prática no contexto real das empresas para confirmar sua aplicabilidade.

A natureza exploratória da pesquisa também influenciou o escopo das análises, que focaram na identificação de barreiras e benefícios da I4.0 sem aprofundar-se em uma análise quantitativa do impacto financeiro ou do retorno sobre o investimento para PMEs. Outro ponto relevante é a dependência de dados secundários coletados de executivos de PMEs na América Latina. Embora esses dados ofereçam uma perspectiva valiosa sobre as expectativas e desafios regionais, eles podem não refletir com total exatidão a realidade de todas as empresas latino-americanas, uma vez que aspectos culturais, econômicos e regulatórios variam significativamente entre países e setores.

5.2 Recomendações para futuros trabalhos

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão do protótipo desenvolvido para incluir sistemas com múltiplas máquinas interconectadas, aproximando-o de um ambiente fabril mais

realista. A ampliação dessa abordagem em diferentes tipos de equipamentos e setores industriais também é recomendada, o que contribuiria para validar e generalizar os resultados obtidos.

Outra linha de pesquisa relevante seria a análise comparativa entre a modernização de equipamentos legados e sua substituição por máquinas nativamente compatíveis com as tecnologias da I4.0, considerando o impacto econômico de cada alternativa. Além disso, estudos que explorem com maior profundidade as barreiras culturais e financeiras para a adoção da I4.0 na América Latina são necessários, com o objetivo de identificar e propor estratégias eficazes para superá-las.

Além disso, recomenda-se a substituição do atual sistema de armazenamento local em arquivos formato csv por uma base de dados estruturada, mesmo que gratuita, como SQLite ou MySQL Community Edition, para sistemas com múltiplas máquinas. O uso de uma base de dados permite maior flexibilidade na consulta e análise dos dados históricos, melhorando a eficiência do monitoramento e facilitando a criação de relatórios personalizados. Essa mudança se torna ainda mais importante em cenários onde há a necessidade de interligar diferentes equipamentos em tempo real, reduzindo os riscos de perda de dados e aumentando a capacidade de escalar a solução conforme a complexidade do ambiente fabril se expande.

REFERÊNCIAS

- ABDULNOUR, S.; BARIL, C.; ABDULNOUR, G.; GAMACHE, S. Implementation of industry 4.0 principles and tools: simulation and case study in a manufacturing SME. *Sustainability*, v. 14, n. 10, p. 6336, 2022.
- AHMAD, S.; BADWELAN, A.; GHALEB, A. M.; QAMHAN, A.; SHARAF, M.; ALATEFI, M., MOOHIALDIN, A. Analyzing critical failures in a production process: Is industrial IoT the solution?. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2018, p. 1-12, 2018.
- ALABADI, M.; HABBAL, A.; WEI, X. Industrial internet of things: Requirements, architecture, challenges, and future research directions. *IEEE Access*, v. 10, p. 66374-66400, 2022.
- AMARAL, A.; PEÇAS, P. A framework for assessing manufacturing SMEs Industry 4.0 maturity. *Applied Sciences*, v. 11, n. 13, p. 6127, 2021.
- BAZAN, P.; ESTEVEZ, E. Industry 4.0 and business process management: state of the art and new challenges. *Business Process Management Journal*, v. 28, n. 1, p. 62-80, 2022.
- BELLI, L.; DAVOLI, L.; MEDIOLI, A.; MARCHINI, P. L.; FERRARI, G. Toward Industry 4.0 with IoT: Optimizing business processes in an evolving manufacturing factory. *Frontiers in ICT*, v. 6, p. 17, 2019.
- BOUCHARD, S.; GAMACHE, S.; ABDULNOUR, G. Operationalizing Mass Customization in Manufacturing SMEs—A Systematic Literature Review. *Sustainability*, v. 15, n. 4, p. 3028, 2023.
- BRODEUR, J.; PELLERIN, R.; DESCHAMPS, I. Operationalization of critical success factors to manage the industry 4.0 transformation of manufacturing SMEs. *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 8954, 2022.
- BURINSKIENĚ, A.; NALIVAIKĚ, J. Digital and Sustainable (Twin) Transformations: A Case of SMEs in the European Union. *Sustainability*, v. 16, n. 4, p. 1533, 2024.
- BUSTO PARRA, B.; PANDO CERRA, P.; ÁLVAREZ PEÑÍN, P. I. Combining ERP, lean philosophy and ICT: An Industry 4.0 approach in an SME in the manufacturing sector in Spain. *Engineering Management Journal*, v. 34, n. 4, p. 655-670, 2022.
- CAO, Q.; SAMET, A.; ZANNI-MERK, C.; DE BERTRAND DE BEUVRON, F.; REICH, C. Combining chronicle mining and semantics for predictive maintenance in manufacturing processes. *Semantic Web*, v. 11, n. 6, p. 927-948, 2020.
- CHATFIELD, S. L. Recommendations for secondary analysis of qualitative data. *The Qualitative Report*, v. 25, n. 3, p. 833-842, 2020.
- CHAVEZ, Z.; HAUGE, J. B.; BELLGRAN, M. Industry 4.0, transition or addition in SMEs? A systematic literature review on digitalization for deviation management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1-20, 2022.

CHEN, J.-Y.; TAI, K.-C.; CHEN, G.-C. Application of programmable logic controller to build-up an intelligent industry 4.0 platform. **Procedia Cirp**, v. 63, p. 150-155, 2017.

CHIARINI, A.; KUMAR, M. Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for Operational Excellence: evidence from Italian manufacturing companies. **Production planning & control**, v. 32, n. 13, p. 1084-1101, 2021.

CIMINI, C.; BOFFELLI, A.; LAGORIO, A.; KALCHSCHMIDT, M.; PINTO, R. How do industry 4.0 technologies influence organisational change? An empirical analysis of Italian SMEs. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 32, n. 3, p. 695-721, 2020.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Sondagem especial**, Brasília, DF, ano 23, n. 88, jun. 2023. Disponível em:<
https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/88/c3/88c3a7d5-2902-41ef-8eec-ca7a309c7a5a/sondespecial_idadedasmaquinas_julho2023.pdf>. Acesso em: 13 set. 23.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Sondagem especial**, Brasília, DF, ano 21, n. 83, abr. 2022. Disponível em:<
<https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-83-industria-40-cinco-anos-depois/>>. Acesso em: 13 set. 23.

CRESWELL, J. W. **Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2012.

DA SILVA SOUZA, W.; BONAMIGO, A. Lean 4.0: an integrated analysis of lean manufacturing and advanced manufacturing. In: ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 43, 2023, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Abepro, 2023.

DESHPANDE, A.; PIEPER, R. Legacy Machine Monitoring Using Power Signal Analysis. In: ASME INTERNATIONAL MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING CONFERENCE, 2011, Corvallis, Oregon, USA. **Proceedings...** New York: ASME, 2011. v. 2, p. 207-214.

DESHPANDE, S.; PADALKAR, S.; ANAND, S. IIoT based framework for data communication and prediction using augmented reality for legacy machine artifacts. **Manufacturing Letters**, v. 35, p. 1043-1051, 2023.

DEVI, A. G.; T, A.; SATPATHY, R.; NAYAK, M.; REKA, M.; MOHAPATRA, P. K. Prediction of maintenance time and IoT device failures using artificial intelligence. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL, COMPUTING, COMMUNICATION AND SUSTAINABLE TECHNOLOGIES (ICAECT), 2022, Bhilai, India. **Proceedings...** Bhilai: IEEE, 2022. p. 1-5.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype?[industry forum]. **IEEE industrial electronics magazine**, v. 8, n. 2, p. 56-58, 2014.

DURIGAN, P. d. T.; SHIKI, S. B.; BARBOSA, G. F.; ANTONIALLI, A. Í. S. On the potential of low-cost instrumentation for digitalization of legacy machine tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 128, n. 5-6, p. 1929-1941, 2023.

EJSMONT, K.; GLADYSZ, B.; CORTI, D.; CASTAÑO, F.; MOHAMMED, W. M.; MARTINEZ LASTRA, J. L.; FOROUDI, P. Towards 'Lean Industry 4.0' – Current trends and future perspectives. **Cogent Business & Management**, v. 7, n. 1, p. 1781995, 2020.

ELSEVIER. **Conteúdo do Scopus**. Elsevier, 2024. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/pt-br/products/scopus/content#1-profundidade-hist%C3%B3rica>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ENDRÓDI-KOVÁCS, V.; STUKOVSKY, T. The adoption of industry 4.0 and digitalisation of Hungarian SMEs. **Society and Economy**, v. 44, n. 1, p. 138-158, 2022.

FAN, Y.-C.; CHANG, J.-Y. J. Embedded Smart Box for Legacy Machines to Approach to I 4.0 in Smart Manufacturing. In: MATEC WEB OF CONFERENCES, 2018. **Proceedings...** EDP Sciences, 2018. p. 00027.

FETTERMANN, D. C.; CAVALCANTE, C. G. S.; ALMEIDA, T. D. DE; TORTORELLA, G. L. How does Industry 4.0 contribute to operations management?. **Journal of industrial and Production Engineering**, v. 35, n. 4, p. 255-268, 2018.

FLICK, U. **An Introduction to Qualitative Analysis**. 4 ed. London: Sage Publications, 2009.

FLORESCU, A.; BARABAS, S. Development trends of production systems through the integration of lean management and industry 4.0. **Applied Sciences**, v. 12, n. 10, p. 4885, 2022.

GALVÃO, T. F.; TIGUMAN, G.M.B., SARKIS-ONOFRE, R. A declaração PRISMA 2020: Diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Epidemiologia e serviços de saúde: revista do Sistema Único de Saúde do Brasil**, v. 31, n. 2, p. e2022107, 2022.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 128 p. ISBN 978-85-97-01292-7.

GOKILAKRISHNAN, G.; V., M.; DHANAMURUGAN, A.; BHASHA, A.; SUBBIAH, R.; H., A. A review of applications, enabling technologies, growth challenges and solutions for IoT/IIoT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTING AND COMMUNICATION SYSTEMS, 9, 2023, Coimbatore, Índia. **Proceedings...** Coimbatore: IEEE, 2023. p. 2241-2250.

GOKNIL, A.; NGUYEN, P.; BENSALAM, S.; POLITAKI, D.; KONDYLAKIS, H.; PEDERSEN, K.; SUYUTHI, A.; ANAND, A.; ZIEGENBEIN, J. B. A systematic review of data quality in CPS and IoT for Industry 4.0. **ACM Computing Surveys**, v. 55, n. 7, art. 133, p. 1-38, 2023.

GROOSS, O. F.; PRESSER, M.; TAMBO, T. Surround yourself with your betters: Recommendations for adopting Industry 4.0 technologies in SMEs. **Digital Business**, p. 100046, 2022.

HAWKRIDGE, G.; MUKHERJEE, A.; MCFARLANE, D.; TLEGENOV, Y.; PARLIKAD, A. K.; REYNER, N. J.; THORNE, A. Monitoring on a shoestring: Low cost solutions for digital manufacturing. **Annual Reviews in Control**, v. 51, p. 374-391, 2021.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In: 49TH HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES (HICSS), 2016, Koloa, HI, USA. **Proceedings...** Koloa: IEEE, 2016. p. 3928-3937.

HO, M.-H.; LAI, M.-Y.; LIU, Y. Implementation of DDS Cloud Platform for Real-Time Data Acquisition of Sensors for a Legacy Machine. **Electronics**, v. 11, n. 13, p. 2096, 2022.

HUANG, Z.; JOWERS, C.; KENT, D.; DEHGHAN-MANSHADI, A.; DARGUSCH, M. S. The implementation of Industry 4.0 in manufacturing: From lean manufacturing to product design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 121, n. 5-6, p. 3351-3367, 2022.

HUNG, H.-C.; CHEN, Y.-W. Striving to Achieve United Nations Sustainable Development Goals of Taiwanese SMEs by Adopting Industry 4.0. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2111, 2023.

INGALDI, M.; ULEWICZ, R. Problems with the Implementation of Industry 4.0 in Enterprises from the SME Sector. **Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 217, 2019.

JABBOUR, A. B. L. D. S.; JABBOUR, C. J. C.; FILHO, M. G.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, p. 273-286, 2018.

JAIN, S.; CHANDRASEKARAN, K. Industrial automation using internet of things. In: **Research Anthology on Cross-Disciplinary Designs and Applications of Automation**. IGI Global, 2022. p. 355-383.

JIWANGKURA, S.; SOPHATSATHIT, P.; CHANDRACHAI, A. Industrial internet of things implementation strategies with HCI for SME Adoption. **International Journal of Automation and Smart Technology**, v. 10, n. 1, p. 153-168, 2020.

JUNG, S.; KIM, D.; SHIN, N. Success Factors of the Adoption of Smart Factory Transformation: An Examination of Korean Manufacturing SMEs. **IEEE Access**, v. 11, p. 2239-2249, 2023.

KADIR, B. A. **Designing new ways of working in Industry 4.0**: Aligning humans, technology, and organization in the transition to Industry 4.0. Orientador: Dr. Ole Broberg. 2020. 181 f. Tese (Ph.D) - Technical University of Denmark, Denmark, 2020.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion, 2013.

KANAWADAY, A.; SANE, A. Machine learning for predictive maintenance of industrial machines using IoT sensor data. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING AND SERVICE SCIENCE, 8, 2017, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing: IEEE, 2017. p. 87-90.

KAPP, V.; MAY, M. C.; LANZA, G.; WUEST, T. Pattern recognition in multivariate time series: Towards an automated event detection method for smart manufacturing systems. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 3, p. 88, 2020.

- KHAN, W. Z.; REHMAN, M. H.; ZANGOTI, H. M.; AFZAL, M. K.; ARMI, N.; SALAH, K. Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. **Computers & Electrical Engineering**, v. 81, p. 106522, 2020.
- KHAN, I. H.; JAVAID, M. Role of Internet of Things (IoT) in adoption of Industry 4.0. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 7, n. 04, p. 515-533, 2022.
- KOLBERG, D.; ZÜHLKE, D. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.
- KOLLA, S. S. V. K.; LOURENÇO, D. M.; KUMAR, A. A.; PLAPPER, P. Retrofitting of legacy machines in the context of Industrial Internet of Things (IIoT). **Procedia Computer Science**, v. 200, p. 62-70, 2022.
- KONSTANTINIDIS, F. K.; MYRILLAS, N.; MOUROUTSOS, S. G.; KOULOURIOTIS, D.; GASTERATOS, A. Assessment of Industry 4.0 for modern manufacturing ecosystem: a systematic survey of surveys. **Machines**, v. 10, p. 746, 2022.
- KOVITO, M. A. Fault Detection of Mechanical Equipment Failure Detection Using Intelligent Data Analysis. **Journal of Systems Engineering and Information Technology (JOSEIT)**, v. 1, n. 2, p. 62-66, 2022.
- KUMAR, N.; SINGH, A.; GUPTA, S.; KASWAN, M. S.; SINGH, M. Integration of Lean manufacturing and Industry 4.0: a bibliometric analysis. **The TQM Journal**, v. 36, n. 1, p. 244-264, 2024.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing letters**, v. 3, p. 18-23, 2015.
- LEVINA, A.; KALYAZINA, S.; ERSHOVA, A.; CORNELIS, P. Schuur. IIOT within the architecture of the manufacturing company. In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “DIGITAL TRANSFORMATION ON MANUFACTURING, INFRASTRUCTURE AND SERVICE”, 2020, Saint Petersburg, Rússia. **Proceedings...** New York: ACM, 2020. p. 1-6.
- LIMA, F.; MASSOTE, A. A.; MAIA, R. F. IoT Energy Retrofit and the Connection of Legacy Machines Inside the Industry 4.0 Concept. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON), 45, 2019, Lisboa, Portugal. **Proceedings...** Lisboa: IEEE, 2019. p. 5499-5504.
- LOCKWOOD, A. J.; HILL, G.; MOLDOVEANU, M.; COLES, R.; SCOTT, R. **Digitalisation of legacy machine tools**. Tech. rep., Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) University of Sheffield, 2018.
- LOGICALIS. **IoT Snapshot 2024**. Disponível em: <<https://imagine.la.logicalis.com/pt-br/iot-snapshot-2024>>. Acesso em: 10 set. 2024.
- MASOOD, T.; SONNTAG, P. Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. **Computers in Industry**, v. 121, p. 103261, 2020.

- MELO, I. C.; QUEIROZ, G. A.; JUNIOR, P. N. A.; DE SOUSA, T. B.; YUSHIMITO, W. F.; PEREIRA, J. Sustainable digital transformation in small and medium enterprises (SMEs): a review on performance. **Heliyon**, v. 9, n. 3, 2023.
- MICHNA, A.; KMIĘCIAK, R. Open-mindedness culture, knowledge-sharing, financial performance, and industry 4.0 in SMEs. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9041, 2020.
- MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards lean production in industry 4.0. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 466-473, 2017.
- MUKHERJEE, S.; BARAL, M. M.; CHITTIPAKA, V.; NAGARIYA, R.; PATEL, B. S. Achieving organizational performance by integrating industrial Internet of things in the SMEs: a developing country perspective. **The TQM Journal**, v. 36, n. 1, p. 265-287, 2024.
- NAGY, J.; OLÁH, J.; ERDEI, E.; MÁTÉ, D.; POPP, J. The role and impact of Industry 4.0 and the Internet of Things on the business strategy of the value chain—the case of Hungary. **Sustainability**, v. 10, n. 10, art. 3491, 2018.
- NGUYEN, H. D.; TRAN, K. P.; ZENG, X.; KOEHL, L.; CASTAGLIOLA, P. Industrial Internet of Things, big data, and artificial intelligence in the smart factory: a survey and perspective. In: ISSAT INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA SCIENCE IN BUSINESS, FINANCE AND INDUSTRY, 2019, Da Nang, Vietnã. **Proceedings...** Da Nang: ISSAT, 2019. p. 72-76.
- NGUYEN, V.; DUGENSKE, A. An I2C based architecture for monitoring legacy manufacturing equipment. **Manufacturing Letters**, v. 15, p. 67–70, 2018.
- SOTO-OCAMPO, C. R.; MERA, J. M.; CANO-MORENO, J. D.; GARCIA-BERNARDO, J. L. Low-cost, high-frequency, data acquisition system for condition monitoring of rotating machinery through vibration analysis-case study. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3493, 2020.
- OHNO, T. **Toyota production system: beyond large-scale production**. Productivity press, 2019.
- PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HROBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021.
- PEREIRA, A. C.; DINIS-CARVALHO, J.; ALVES, A. C.; AREZES, P. How Industry 4.0 can enhance lean practices. **FME Transactions**, v. 47, n. 4, p. 810-822, 2019.
- PEKER, K.; YILDIZ, M.; TURGAY, S. Improving quality inspections with image analysis and artificial intelligence. **Accounting and Corporate Management**, v. 5, n. 11, p. 135-146, 2023.
- PICCIALLI, F.; BESSIS, N.; CAMBRIA, E. Guest editorial: Industrial Internet of Things: Where are we and what is next?. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 11, p. 7700-7703, 2021.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Perfil da Indústria Brasileira**. Disponível em: <<https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/#/industria-transformacao>>. Acesso em: 06 fev. 2024.

PRASANNA, K.; RAMANA, K.; DHIMAN, G.; KAUTISH, S.; CHAKRAVARTHY, V. D. PoC design: a methodology for proof-of-concept (PoC) development on Internet of Things connected dynamic environments. **Security and Communication Networks**, v. 2021, p. 1-12, 2021.

PRAUSE, M. Challenges of industry 4.0 technology adoption for SMEs: the case of Japan. **Sustainability**, v. 11, n. 20, p. 5807, 2019.

PRIYASHAN, W. D. M.; THILAKARATHNE, N. N. IIoT framework for sme level injection molding industry in the context of industry 4.0. **International Journal of Engineering and Management Research**, v. 10, n. 6, p. 61-68, 2020.

QUEIROZ, G. A.; ALVES JUNIOR, P. N.; MELO, I. C. Digitalization as an enabler to SMEs implementing lean-green? A systematic review through the topic modelling approach. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14089, 2022.

QURESHI, K. M.; MEWADA, B. G.; KAUR, S.; QURESHI, M. R. N. M. Assessing lean 4.0 for industry 4.0 readiness using PLS-SEM towards sustainable manufacturing supply chain. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 3950, 2023.

QURESHI, K. M.; MEWADA, B. G.; BUNIYA, M. K.; QURESHI, M. R. N. M. Analyzing critical success factors of Lean 4.0 implementation in small and medium enterprises for sustainable manufacturing supply chain for Industry 4.0 using PLS-SEM. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5528, 2023.

QIU, T.; CHI, J.; ZHOU, X.; NING, Z.; ATIQUZZAMAN, M.; WU, D. O. Edge computing in industrial Internet of Things: architecture, advances and challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 22, n. 4, p. 2462-2488, 2020.

RAHAMADULLA, S. R. B.; LEMAN, Z.; BAHARUDIN, B. H. T. B.; AHMAD, S. A. Conceptualizing smart manufacturing readiness-maturity model for small and medium enterprise (SME) in Malaysia. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9793, 2021.

RAHARDJO, B.; WANG, F. K.; YEH, R. H.; CHEN, Y. P. Lean manufacturing in Industry 4.0: a smart and sustainable manufacturing system. **Machines**, v. 11, n. 1, p. 72, 2023.

RAJARAJAN, S.; RENUKADEVI, S.; MOHAMMED ABU BASIM, N. Industrial IoT and intelligent manufacturing. In: **Futuristic Trends in Intelligent Manufacturing: Optimization and Intelligence in Manufacturing**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 185-203.

RAUCH, E.; UNTERHOFER, M.; ROJAS, R. A.; GUALTIERI, L.; WOSCHANK, M.; MATT, D. T. A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of Industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3559, 2020.

RETHLEFSEN, M. L.; KIRTLEY, S.; WAFFENSCHMIDT, S.; AYALA, A. P.; MOHER, D.; PAGE, M. J.; KOFFEL, J. B. PRISMA-S: an extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, p. 1-19, 2021.

ROY, M.; ROY, A. Nexus of internet of things (IoT) and big data: roadmap for smart management systems (SMgS). **IEEE Engineering Management Review**, v. 47, n. 2, p. 53-65, 2019.

RUGGIANO, N.; PERRY, T. E. Conducting secondary analysis of qualitative data: Should we, can we, and how? **Qualitative Social Work**, v. 18, n. 1, p. 81-97, 2019.

RUPP, M.; SCHNECKENBURGER, M.; MERKEL, M.; BÖRRET, R.; HARRISON, D. K. Industry 4.0: a technological-oriented definition based on bibliometric analysis and literature review. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 7, n. 1, p. 68, 2021.

SACOMANO, J. B.; GONÇALVES, R. F.; BONILLA, S. H.; DA SILVA, M. T.; SÁTYRO, W. C. **Indústria 4.0**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

SAAD, S. M.; BHOVAR, C.; BAHADORI, R.; ZHANG, H. Industry 4.0 application in lean manufacturing – a systematic review. **Advances in Manufacturing Technology XXXIV**, p. 341-346, 2021.

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. P. Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)**, v. 9, n. 3, p. 811-833, 2016.

SANTOS, K.; LOURES, E.; PIECHNICKI, F.; CANCEGLIERI, O. Opportunities assessment of product development process in Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1358-1365, 2017.

SATYRO, W. C.; CONTADOR, J. C.; MONKEN, S. F. de P.; LIMA, A. F. de; SOARES JUNIOR, G. G.; GOMES, J. A.; NEVES, J. V. S.; NASCIMENTO, J. R. do; ARAÚJO, J. L. de; CORREA, E. de S.; SILVA, L. S. Industry 4.0 implementation projects: the cleaner production strategy—a literature review. **Sustainability**, v. 15, p. 2161, 2023.

SAXBY, R.; CANO-KOUROUKLIS, M.; VIZA, E. An initial assessment of Lean Management methods for Industry 4.0. **The TQM Journal**, v. 32, n. 4, p. 587-601, 2020.

SCHÖNFUß, B.; McFARLANE, D.; HAWKRIDGE, G.; SALTER, L.; ATHANASSOPOULOU, N.; DE SILVA, L. A catalogue of digital solution areas for prioritising the needs of manufacturing SMEs. **Computers in Industry**, v. 133, p. 103532, 2021.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. Edipro, 2019.

SHAFIQ, S. I.; SANIN, C.; SZCZEBICKI, E.; TORO, C. Virtual engineering factory: creating experience base for Industry 4.0. **Cybernetics and Systems**, v. 47, n. 1-2, p. 32-47, 2016.

SHI, Z.; XIE, Y.; XUE, W.; CHEN, Y.; FU, L.; XU, X. Smart factory in Industry 4.0. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 37, n. 4, p. 607-617, 2020.

SHQAIR, M. I.; ALTARAZI, S. A. Evaluating the status of SMEs in Jordan with respect to Industry 4.0: a pilot study. **Logistics**, v. 6, n. 4, p. 69, 2022.

SMIT, J.; KREUTZER, S.; MOELLER, C.; CARLBERG, M. Policy department A: economic and scientific policy – Industry 4.0. **European Parliament, EU**, p. 1-94, 2016.

SERPANOS, D.; WOLF, M.; SERPANOS, D.; WOLF, M. Industrial internet of things. **Internet-of-Things (IoT) Systems: Architectures, Algorithms, Methodologies**, v. 1, p. 37-54, 2018.

SOSA-REYNA, C. M.; TELLO-LEAL, E.; LARA-ALABAZARES, D. Methodology for the model-driven development of service oriented IoT applications. **Journal of Systems Architecture**, v. 90, p. 15-22, 2018.

SREEDHARAN, R. Dealing with applications in Industrial IoT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY INNOVATION (ICOSTEC), 2, 2023, February. **Proceedings...** p. 122-126.

TAO, F.; CHENG, J.; QI, Q.; ZHANG, M.; ZHANG, H.; SUI, F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, p. 3563-3576, 2018.

TICK, A.; SAÁRY, R.; KÁRPÁTI-DARÓCZI, J. Conscious or indifferent—concerns on digitalisation and sustainability among SMEs in Industry 4.0. **Serbian Journal of Management**, v. 17, n. 1, p. 145-160, 2022.

TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2975-2987, 2018.

TRIPATHI, V.; CHATTOPADHYAYA, S.; MUKHOPADHYAY, A. K.; SHARMA, S.; LI, C.; DI BONA, G. A sustainable methodology using lean and smart manufacturing for the cleaner production of shop floor management in Industry 4.0. **Mathematics**, v. 10, p. 347, 2022.

TÜRKEŞ, M. C.; ONCIOIU, I.; ASLAM, H. D.; MARIN-PANTELESCU, A.; TOPOR, D. I.; CĂPUŞNEANU, S. Drivers and barriers in using Industry 4.0: A perspective of SMEs in Romania. **Processes**, v. 7, n. 3, p. 153, 2019.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. **Itajubá: Unifei**, 2012.

VALAMEDE, L. S.; AKKARI, A. C. S. Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 5, n. 5, p. 851, 2020.

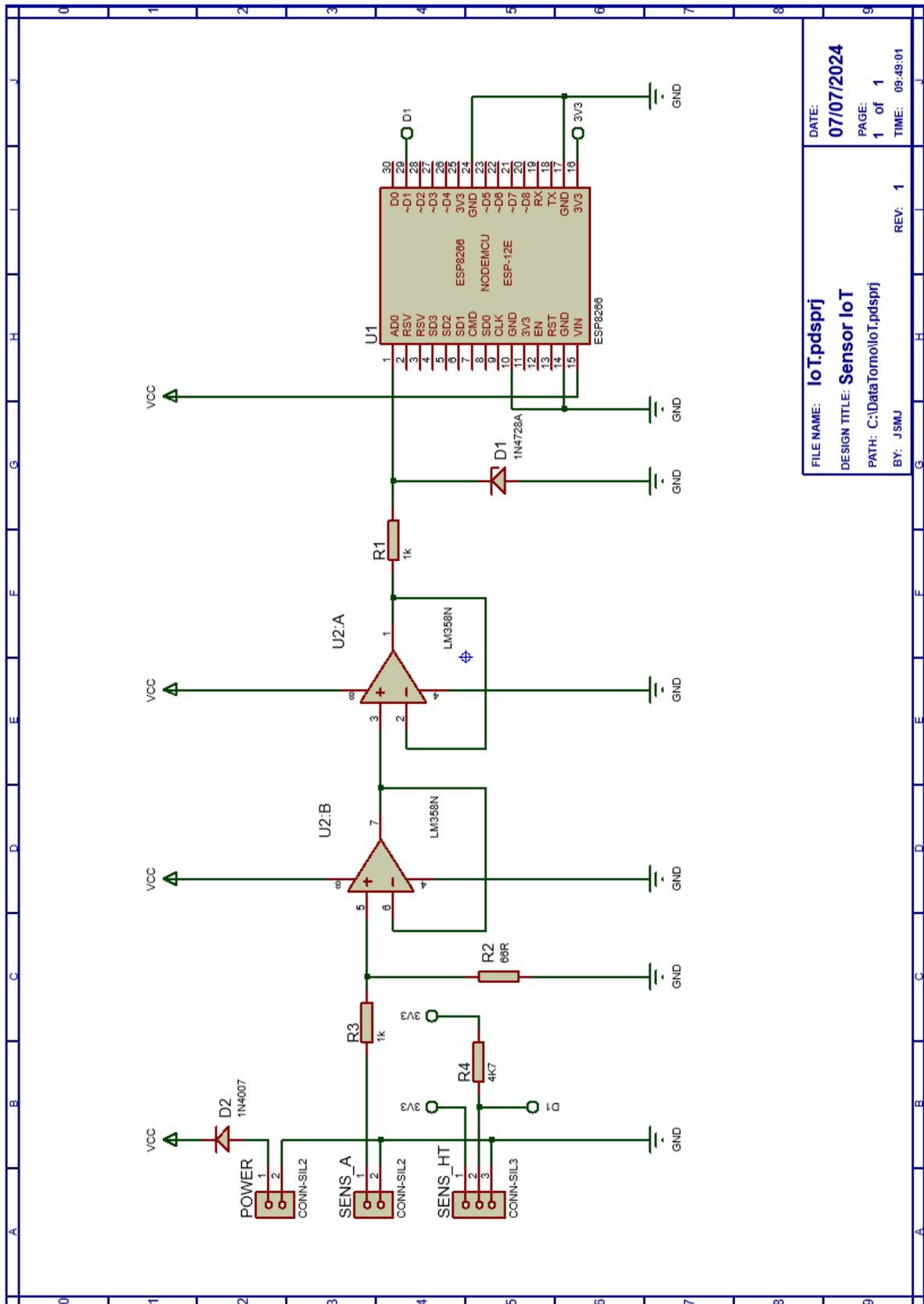
VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

VERMESAN, O.; COPPOLA, M.; BAHR, R.; BELLMANN, R. O.; MARTINSEN, J. E.; KRISTOFFERSEN, A.; HJERTAKER, T.; BREILAND, J.; ANDERSEN, K.; SAND, H. E.; LINDBERG, D. An intelligent real-time edge processing maintenance system for industrial manufacturing, control, and diagnostic. **Frontiers in Chemical Engineering**, v. 4, p. 900096, 2022.

- VLACHOS, I. P.; PASCAZZI, R. M.; ZOBOLAS, G.; REPOUSSIS, P.; GIANNAKIS, M. Lean manufacturing systems in the area of Industry 4.0: A lean automation plan of AGVs/IoT integration. **Production Planning & Control**, v. 34, n. 4, p. 345-358, 2023.
- VOZA, D.; SZEWIECZEK, A.; GRABARA, D. Environmental sustainability in digitalized SMEs: comparative study from Poland and Serbia. **Serbian Journal of Management**, v. 17, n. 1, p. 15-31, 2022.
- VUKOVIĆ, M.; JORG, O.; HOSSEINIFARD, M.; FANTONI, G. Low-cost digitalization solution through scalable iiot prototypes. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8571, 2022.
- WANG, S.; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. Implementing smart factory of Industrie 4.0: an outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, p. 3159805, 2016.
- WONG, A. P. H.; KEE, D. M. H. Driving factors of industry 4.0 readiness among manufacturing smes in Malaysia. **Information**, v. 13, n. 12, p. 552, 2022.
- XING, K.; LIU, X.; LIU, Z.; MAYER, J.; ACHICHE, S. Low-cost precision monitoring system of machine tools for SMEs. **Procedia CIRP**, v. 96, p. 347-352, 2021.
- XU, H.; YU, W.; GRIFFITH, D.; GOLMIE, N. A survey on industrial Internet of Things: A cyber-physical systems perspective. **IEEE Access**, v. 6, p. 78238-78259, 2018.
- XU, Q.; CHEN, X.; LI, S.; ZHANG, H.; BABAR, M. A.; TRAN, N. K. Blockchain-based solutions for IoT: a tertiary study. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE QUALITY, RELIABILITY AND SECURITY COMPANION (QRS-C), 20., 2020, Macau, China. **Proceedings...** New York: IEEE, 2020. p. 124-131.
- YIN, R. K. **Pesquisa qualitativa do início ao fim**. Penso Editora, 2016.
- YOUNAN, M.; HOUSSEIN, E. H.; ELHOSENY, M.; ALI, A. A. Challenges and recommended technologies for the industrial Internet of Things: A comprehensive review. **Measurement**, v. 151, p. 107198, 2020.
- YU, F.; SCHWEISFURTH, T. Industry 4.0 technology implementation in SMEs—A survey in the Danish-German border region. **International Journal of Innovation Studies**, v. 4, n. 3, p. 76-84, 2020.
- ZHANG, J.; LAN, S.; LIU, L.; HE, R. Research on full-process product defect traceability analysis technology based on workshop big data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALGORITHMS, HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AHPCAI), 2, 2022, Guangzhou, China. **Proceedings...** Guangzhou: IEEE, 2022. p. 240-246.
- ZHENG, P.; WANG, H.; SANG, Z.; ZHONG, R. Y.; LIU, Y.; LIU, C.; MUBAROK, K.; YU, S.; XU, X. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 13, p. 137-150, 2018.
- ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. **Engineering**, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017.

ZHOU, B. Lean principles, practices, and impacts: a study on small and medium-sized enterprises (SMEs). **Annals of Operations Research**, v. 241, p. 457-474, 2016.

APÊNDICE A – ESQUEMA ELÉTRICO



O circuito do apêndice A representa uma implementação IIoT, o componente central do NodeMCU é um microcontrolador ESP8266 (U1), conhecido por sua eficiência energética e capacidades de conectividade sem fio integradas.

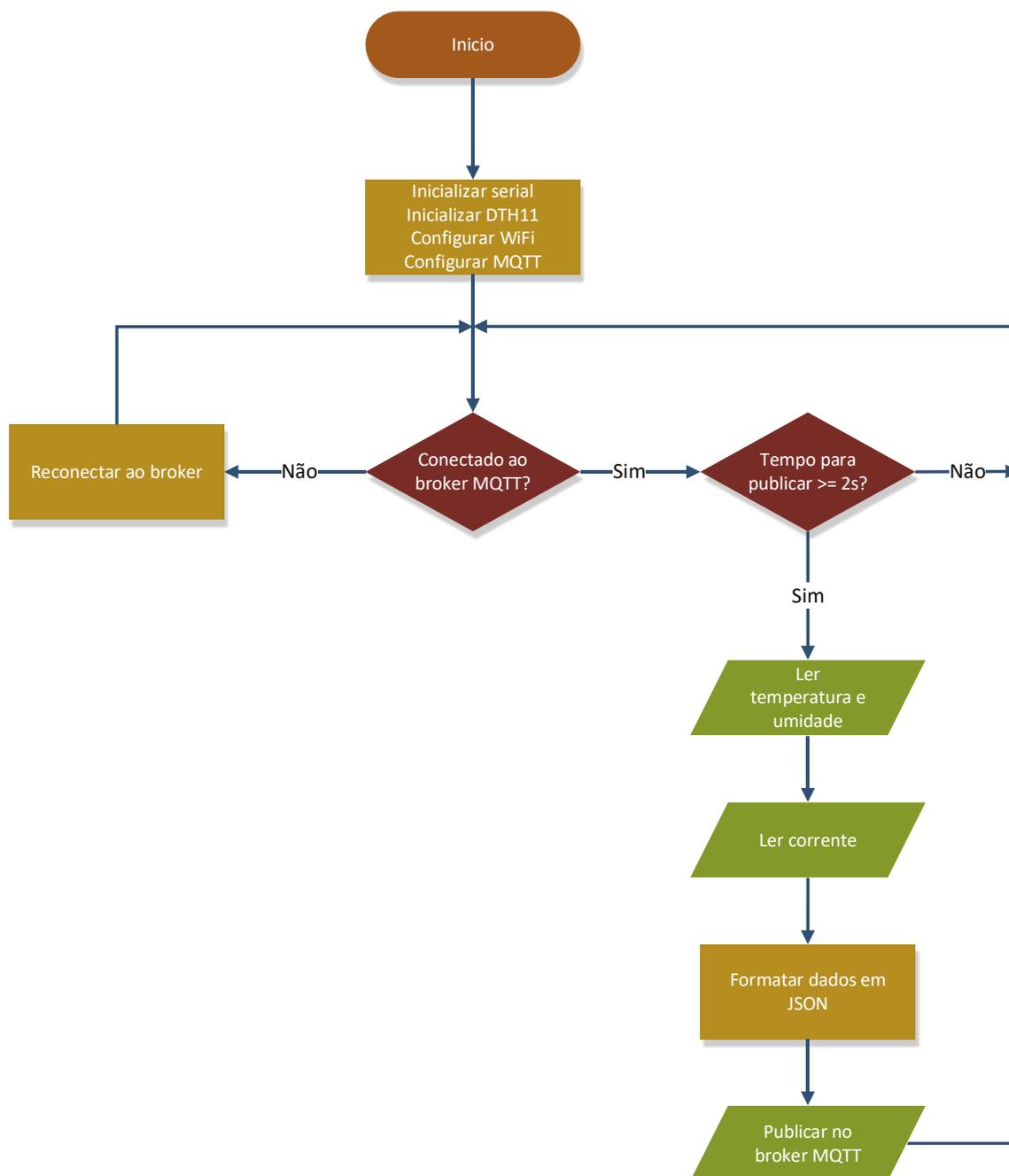
A arquitetura do circuito é composta pelos seguintes elementos principais:

- **Unidade de Processamento:** o ESP8266 (U1) serve como o núcleo de processamento e comunicação. Este microcontrolador é amplamente utilizado em aplicações IoT devido à sua capacidade de processamento embarcado e conectividade Wi-Fi nativa. Os pinos do ESP8266 estão interconectados com várias seções do circuito, incluindo os amplificadores operacionais e os conectores dos sensores, facilitando a aquisição e processamento dos dados.
- **Condicionamento de Sinal:** o circuito incorpora dois amplificadores operacionais LM358N (U2A e U2B). Estes componentes são responsáveis pelo condicionamento do sinal de entrada, realizando a função de seguidor de tensão, garantindo alta impedância de entrada e máxima transferência do sinal, essenciais para a integridade e precisão dos dados coletados.
- **Regulação de Tensão:** um diodo zener (D1), identificado como 1N4728A, desempenha um papel na regulação ou estabilização da tensão, fundamental para o funcionamento confiável do sistema em condições variáveis do sinal de entrada limitando o seu valor em 3,3 V.
- **Interfaces de Entrada/Saída:** o circuito apresenta conectores designados para POWER (alimentação), SENS_A (sensor de corrente) e SENS_HT (sensor de umidade e temperatura).
- **Componentes Passivos:** resistores (R1, R2, R3, R4) estão estrategicamente posicionados no circuito. Estes elementos são fundamentais para a configuração adequada do circuito e para garantir a estabilidade do sistema. Destacando R2 igual a 66Ω , que garante o consumo máximo de corrente do sensor SCT-013, de 50 mA, proporcionando uma tensão máxima do NodeMCU de 3,3 V.

Esta topologia de circuito é otimizada para a aquisição de dados dos sensores SCT-013 e DTH11, seu processamento local e subsequente transmissão através da interface Wi-Fi do NodeMCU. A flexibilidade do design permite a adaptação a diversos tipos de sensores, enquanto o estágio de condicionamento de sinal assegura a qualidade dos dados antes de sua digitalização pelo microcontrolador.

A arquitetura proposta exemplifica um IoT típico, capaz de coletar, processar e transmitir dados de forma eficiente, contribuindo para a implementação de sistemas de monitoramento e controle distribuídos em aplicações IoT.

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO *FIRMWARE*



O fluxograma do apêndice B ilustra o fluxo de execução de um sistema de monitoramento IoT baseado no NodeMCU, utilizando o protocolo MQTT para comunicação em rede. Este sistema é projetado para coletar dados ambientais e elétricos em um ambiente industrial, especificamente para monitoramento de máquinas. A estrutura do sistema pode ser decomposta em várias fases distintas e interconectadas:

1. Fase de Inicialização: o processo inicia-se com a configuração dos componentes essenciais do sistema. Primeiramente, a comunicação serial é estabelecida, permitindo a depuração e o monitoramento do dispositivo. Em seguida, o sensor DHT (Temperatura e

Umidade) é inicializado, preparando-o para a coleta de dados ambientais. A conexão Wi-Fi é então configurada, estabelecendo a base para a comunicação em rede. Por fim, o cliente MQTT é configurado, definindo os parâmetros necessários para a comunicação com o *broker* MQTT.

2. Loop Principal de Execução: após a inicialização, o sistema entra em um loop contínuo, que constitui o núcleo operacional do dispositivo. Este loop é caracterizado por duas verificações principais:

a) Verificação de Conectividade MQTT: o sistema constantemente monitora a conexão com o *broker* MQTT. Em caso de desconexão, um processo de reconexão é iniciado, garantindo a robustez e a continuidade da comunicação.

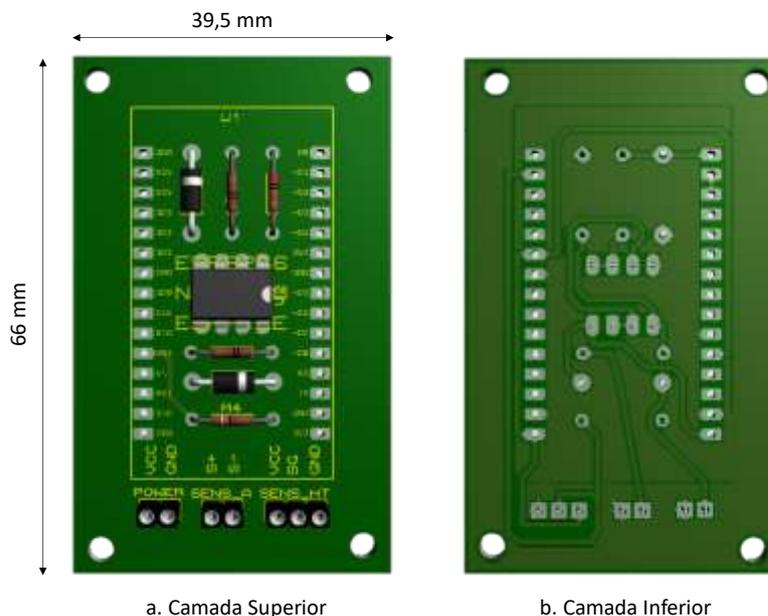
b) Temporização para Publicação de Dados: um mecanismo de temporização é implementado para controlar a frequência de publicação dos dados. No caso específico, esta verificação ocorre a cada 2 segundos, otimizando o equilíbrio entre a atualização frequente dos dados e a eficiência do sistema.

3. Processo de Coleta e Publicação de Dados: quando o intervalo de publicação é atingido, o sistema executa uma sequência de operações:

- Leitura de temperatura e umidade do sensor DHT.
- Medição da corrente elétrica através de um sensor analógico.
- Formatação dos dados coletados em uma estrutura JSON, facilitando a interoperabilidade e o processamento posterior.
- Publicação dos dados formatados no tópico MQTT designado.

A arquitetura apresentada no fluxograma demonstra uma abordagem para sistemas IIoT de monitoramento industrial, utilizando o protocolo MQTT para uma comunicação leve e eficaz, ideal para dispositivos com recursos limitados como o NodeMCU. A estrutura de loop com verificações periódicas assegura uma operação contínua, exemplificando a aplicação prática de conceitos de IoT, redes de sensores sem fio e automação industrial. Este sistema é capaz de fornecer dados em tempo real sobre as condições operacionais de máquinas, contribuindo potencialmente para melhorias em eficiência operacional, manutenção preditiva e controle de qualidade em ambientes de manufatura.

APÊNDICE C – LAYOUT DA PCI



As figuras ilustram o layout da PCI de dupla face, projetada para implementar o esquema elétrico do apêndice A. A imagem é composta por duas vistas distintas:

- a. Camada Superior: Esta vista exhibe a disposição dos componentes e as trilhas condutoras na face superior da PCI. O elemento ao centro é um amplificador operacional, o LM358N mencionado no esquema elétrico anterior. Este componente está circundado por elementos passivos, incluindo resistores e diodos. Na periferia da placa, observam-se conectores destinados à montagem do NodeMCU utilizando a técnica de módulo empilhado (*stack-on module*). Esta abordagem de integração otimiza o uso do espaço e permite uma configuração mais compacta do sistema. Conectores para alimentação (POWER) e sensores (SENS_A e SEN_HT) são visíveis na extremidade inferior da placa.
- b. Camada Inferior: Esta vista apresenta o layout das trilhas condutoras na face inferior da PCI. Nota-se a ausência de componentes, característico desta camada. O padrão de trilhas complementa a camada superior, otimizando o roteamento e facilitando a interconexão com o NodeMCU montado como módulo empilhado.

Este layout demonstra uma estratégia de design que prioriza a miniaturização e a eficiência espacial, características vitais para dispositivos IoT. A disposição dos componentes e o roteamento das trilhas refletem uma consideração cuidadosa da integridade do sinal e da facilidade de montagem.

APÊNDICE D – COMPARATIVO DA INFRAESTRUTURA IOT

O Quadro D.1 apresentado neste apêndice demonstra diversas abordagens e tecnologias utilizadas para o monitoramento de máquinas, com foco na digitalização de máquinas-ferramenta legadas. O quadro destaca a variedade de sensores, microcontroladores ou computadores, redes de comunicação e plataformas de software empregados em diferentes estudos de caso, evidenciando a ampla gama de soluções disponíveis para integrar máquinas legadas em ambientes de produção digitalizados.

Quadro D.1 – Recomendações para implementação de IIoT em PMEs

Autor (ano)	Arquitetura IIoT				Alvo
	Objeto	Rede/ Protocolo	Serviço	Aplicação	
Deshpande et al. (2023)	Computer Vision Toolkit (CVT)	Wi-Fi/ MTConnect REST API MQTT WebSockets	Mindsphere Siemens Node-RED	Aplicativo de Realidade Aumentada baseado no Unity	Máquina de moldagem por injeção
Durigan et al. (2023)	Sensor magnético Sensor de vibração	Wi-Fi/ Ethernet	IoT Thing Speak	Thing Speak	Torno Nardini
Ho, Lai e Liu (2022)	Raspberry Pi Sensor acústico Sensor de vibração Sensor de luminância Sensor óptico Sensor de pressão Sensor de Umidade	Wi-Fi/ OPC-UA MQTT	Serviço de distribuição de dados (DDS) Banco de dados MySQL	Node-RED	Máquina ferramenta
Vuković et al. (2022)	Zerynth 4ZeroBox Sensor de pressão	Wi-Fi/ MQTT	Zerynth Cloud	Zerynth Dashboard	Brochadeira hidráulica
Hawkrige et al. (2021)	Raspberry Pi Sensor de vibração Sensor de temperatura	Wi-Fi/ REST	Banco de dados MySQL	Dash Chart Studio Cloud	Impressora 3D
Xing et al. (2021)	ESP32-CAM Câmera de 2MP	IEEE 802.11	Node-RED Scilab	Node-RED	CNC HU40-T

Autor (ano)	Arquitetura IoT				Alvo
	Objeto	Rede/ Protocolo	Serviço	Aplicação	
Soto-Ocampo et al. (2020)	Raspberry Pi Sensor de vibração	Wi-Fi/HTTP	Armazenamento local	Software de Processamento	Máquinas rotativas
Lima, Massote e Maia (2019)	IoT 2040 Siemens Sensor de consumo de energia Schneider	Wi-Fi e Zigbee/ Modbus TCP/IP	Mindsphere Siemens Node-RED	GRV Software	CNC LabVolt
Nguyen e Dugenske (2018)	Beaglebone Black Teensy 3.2 Sensor de vibração Sensor acústico Sensor magnético	Wi-Fi/ I2C e MQTT	Armazenamento local	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	Serra de fita horizontal
Lockwood et al. (2018)	Arduino Mega 2560 Raspberry Pi 3B Sensores de vibração Sensor de temperatura Transdutor de corrente Sensor de efeito Hall Sensor de proximidade	Wi-Fi / Serial	Node-RED, Websockets, HTML5 e Banco de dados SQL	Website HTML5	Torno Colchester Bantam
Lockwood et al. (2018)	NI Single Board Rio (sbRIO 9627) com módulos de E/S Sensor de vibração Sensor de proximidade a laser Sensor de temperatura Transdutor de corrente	Wi-Fi/ HTTP	LabVIEW e Websockets	WebSite HTML5	Fresadora de torre Bridgeport
Fan e Chang (2018)	Raspberry Pi Sensores de tensão e corrente Sensores digitais para status da máquina	Wi-Fi/ HTTP	Banco de dados MySQL	Website	Máquina legada não especificada

Fonte: Próprio autor (2025).

A primeira coluna do quadro lista os autores e o ano de publicação de cada estudo. Isso permite ao leitor identificar rapidamente a fonte de cada solução apresentada e contextualizar a pesquisa em relação ao desenvolvimento tecnológico ao longo do tempo.

As colunas subsequentes detalham os componentes chave de cada sistema de monitoramento alocados nas camadas correspondentes conforme a metodologia PoC Desing:

- Camada de objetos: Esta coluna especifica os tipos de sensores utilizados para coletar dados da máquina, como vibração, temperatura, pressão, corrente elétrica e posição. E também lista os dispositivos de hardware responsáveis pelo processamento dos dados coletados pelos sensores.
- Camada de Rede: Esta coluna descreve os protocolos e tecnologias de comunicação utilizados para transmitir dados entre os diferentes componentes do sistema de monitoramento. A conectividade em rede é fundamental para permitir a integração da máquina em sistemas de nível superior e a visualização remota dos dados.
- Camada de Serviços: Esta coluna engloba as plataformas de software, serviços de nuvem e ferramentas de análise utilizadas para processar, armazenar e visualizar os dados coletados. A escolha dos serviços depende das necessidades de processamento, armazenamento, visualização e análise de dados.
- Camada de Aplicação: Esta coluna descreve como o usuário final poderá visualizar os dados coletados, como monitoramento do estado da máquina, detecção de falhas, otimização de processos e controle de qualidade.

Por fim, a coluna denominada Alvo especifica o tipo de máquina-ferramenta utilizada em cada estudo de caso, demonstrando a aplicabilidade das soluções para diferentes tipos de máquinas, como tornos, fresadoras, máquinas de brochamento e centros de usinagem.

Em resumo, este quadro fornece uma visão geral das diferentes abordagens para digitalizar máquinas-ferramenta legadas, explorando uma variedade de tecnologias e aplicações. O quadro serve como um recurso valioso para pesquisadores e profissionais que buscam soluções para integrar máquinas legadas em ambientes de produção inteligentes e conectados, contribuindo para a modernização e otimização dos processos de manufatura. A análise detalhada de cada solução, incluindo as tecnologias empregadas e os resultados obtidos, pode ser encontrada nas referências bibliográficas correspondentes.