



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Andrei Tchepurnoy Machado

# **Aplicação da Metodologia TpM-PRO para Retrofit em Plantas Industriais Legadas**

Campinas

2024

Andrei Tchepurnoy Machado

## **Aplicação da Metodologia TpM-PRO para Retrofit em Plantas Industriais Legadas**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cardieri

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Branquinho Caixeta Ferreira

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Andrei Tchepurnoy Machado, e orientada pelo Prof. Dr. Paulo Cardieri.

Campinas

2024

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M18a Machado, Tchepurnoy Andrei, 1975-  
Aplicação da metodologia TpM-PRO para retrofit em plantas industriais  
legadas / Andrei Tchepurnoy Machado. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador(es): Paulo Cardieri.  
Coorientador(es): Luiz Carlos Branquinho Caixeta Ferreira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas  
(UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Retrofit. 2. Indústria 4.0. I. Cardieri, Paulo, 1964-. II. Ferreira, Luiz  
Carlos Branquinho Caixeta, 1984-. III. Universidade Estadual de Campinas  
(UNICAMP). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV.  
Título.

Informações complementares

**Título em outro idioma:** Application of the TpM-PRO methodology for retrofit in  
legacy industrial plants

**Palavras-chave em inglês:**

Retrofit

Industry 4.0

**Área de concentração:** Telecomunicações e Telemática

**Titulação:** Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Paulo Cardieri [Orientador]

Diana Cristina González González

Thiago Caproni Tavares

**Data de defesa:** 02-12-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0008-8017-2553>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0604257842900856>

## COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Andrei Tchepurnoy Machado RA: 263837

Data de defesa: 2 de Dezembro de 2024

Título da Dissertação: “Aplicação da Metodologia TpM-PRO para Retrofit em Plantas Industriais Legadas”

Prof. Dr. Paulo Cardieri (Presidente)

Prof. Dr. Diana Cristina González González

Prof. Dr. Thiago Caproni Tavares

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*Dedico esta dissertação aos meus pais: Luiz Carlos Machado (in memoriam), Evgueniya  
Vassilievna Tchepurnaya.*

# Agradecimentos

À minha família que sempre me proporcionou tudo em todos os aspectos, aos colegas que me apoiaram e incentivaram nas etapas iniciais desse mestrado, ao Professor Dr. Omar C. Branquinho, meu orientador Professor Dr. Paulo Cardieri, Professor Dr. Luiz Carlos Caixeta, Professor Dr. Raphael A. Montali, M.e. Renan Yamaguti e Dr. Pedro Chaves pelo grande suporte, profissionalismo e incentivo. À UNICAMP por ter me dado essa oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

*“Muitas coisas não ousamos empreender por parecerem difíceis; entretanto, são difíceis  
porque não ousamos empreendê-las.”*  
*(Sêneca)*

# Resumo

No Brasil e em diversos outros países, muitas indústrias possuem maquinário antigo em suas plantas, que não está alinhado aos modelos da chamada Indústria 4.0. Embora eficientes e capazes de entregar os produtos ou serviços desejados, essas máquinas frequentemente apresentam desvios de desempenho, o que pode exigir reparos ou adequações. Além disso, essas indústrias enfrentam a necessidade de se integrar à Indústria 4.0 para obter vantagens como aumento de produtividade e eficiência, em um ambiente industrial cada vez mais conectado e intensivo no uso de dados. Esta dissertação aborda o desafio enfrentado por indústrias com sistemas legados ao tentarem se inserir na Indústria 4.0 conectada, devido aos custos e à complexidade de substituir maquinário e sistemas existentes por soluções mais modernas. Especificamente, o trabalho trata do problema de *Retrofit* de máquinas legadas, com foco na modernização dessas máquinas para incorporar melhorias, como monitoramento e controle produtivo mais eficientes, além da manutenção de bases de dados sobre seu funcionamento. A dissertação propõe uma estratégia de *Retrofit* para máquinas legadas, baseada na metodologia de desenvolvimento de soluções de IoT chamada Three Phase Methodology — Projeto (TpM — Pro). Essa metodologia se caracteriza por estabelecer uma sequência lógica de etapas no desenvolvimento da solução, desde o entendimento das necessidades até a implementação. A estratégia proposta aborda as etapas essenciais de um processo de *Retrofit*, incluindo suas limitações impostas pela operação da máquina e aplicada em um caso real de uma indústria do setor metal-mecânico, mostrando o uso da TpM no *Retrofit* de máquinas legadas.

**Palavras-chave:** Internet das coisas, negócio, prova de conceito, metodologia das três fases, Retrofit, maquinário legado, rede de sensores sem fio.



# Abstract

Many industries in Brazil and in several other countries have outdated machinery in their plants that is not aligned with the standards of the so-called Industry 4.0. Although these machines are efficient and capable of delivering the desired products or services, they often exhibit performance deviations, which may require repairs or adjustments. Moreover, these industries face the need to integrate into Industry 4.0, to gain advantages such as increased productivity and efficiency in an increasingly connected and data-intensive industrial environment. This dissertation addresses the challenge faced by industries with legacy systems when trying to integrate into the connected Industry 4.0, due to the costs and complexity of replacing existing machinery and systems with more modern solutions. Specifically, the work deals with the problem of retrofitting legacy machines, focusing on modernizing these machines to incorporate improvements such as more efficient monitoring and production control, as well as maintaining databases on their operation. The dissertation proposes a Retrofit strategy for legacy machines, based on the development methodology of IoT solutions called the Three Phase Methodology - Project (TpM - Pro). This methodology is characterized by establishing a logical sequence of steps in the solution development, from understanding the needs to implementation. The proposed retrofit strategy addresses the essential stages of a Retrofit process, including the potential limitations of this process imposed by the machine's operation. The strategy is applied in a real case of an industry in the metal-mechanical sector, demonstrating the suitability of using TpM in the Retrofit process of legacy machines.

**Keywords:** Internet of things, business, proof of concept, factory division, three-phase methodology, retrofit, legacy machinery, wireless sensor network.

# Lista de ilustrações

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Correlação entre IoT, Indústria 4.0 e IIoT. (SANTOS; LEME; JUNIOR, 2020) . . . . .     | 15 |
| Figura 3.1 – Metodologia TpM e seus agentes (FERREIRA et al., 2022). . . . .                        | 27 |
| Figura 3.2 – Relatório TpM-IoT-Canvas (FERREIRA et al., 2022). . . . .                              | 29 |
| Figura 4.1 – Divisão do sistema produtivo proposto por (GROOVER, 2010). . . . .                     | 31 |
| Figura 4.2 – TpM-PRO com a divisão proposta por (GROOVER, 2010). . . . .                            | 32 |
| Figura 5.1 – Área de atuação da indústria no estudo de caso. . . . .                                | 41 |
| Figura 5.2 – Máquina RD6 retífica de chanfro. . . . .                                               | 42 |
| Figura 5.3 – Setor de retífica de chanfro. . . . .                                                  | 43 |
| Figura 5.4 – Diagrama Canvas da Fase 1. . . . .                                                     | 46 |
| Figura 5.5 – Medição de corrente da máquina RD6 de retífica de chanfro (MACHADO, 2023). . . . .     | 51 |
| Figura 5.6 – Diagrama em bloco da medição da corrente. . . . .                                      | 52 |
| Figura 5.7 – Topologia da rede sem fio. . . . .                                                     | 53 |
| Figura 5.8 – Planta baixa do ambiente e a rede sem fio instalada (FABRICA, 2015). . . . .           | 53 |
| Figura 5.9 – Funcionamento do roteamento do protocolo MoT. (BRANQUINHO, 2022) . . . . .             | 54 |
| Figura 5.10–Funcionamento básico do protocolo MoT. (BRANQUINHO, 2022) . . . . .                     | 54 |
| Figura 5.11–Descrição da estrutura que compõe o protocolo MoT (BRANQUINHO, 2022). . . . .           | 55 |
| Figura 6.1 – Arquivos de log RSSI. . . . .                                                          | 57 |
| Figura 6.2 – Arquivos de log RSSI e medidas de corrente. . . . .                                    | 58 |
| Figura 6.3 – Rotas implementadas no <i>script</i> de requisição . . . . .                           | 58 |
| Figura 6.4 – Enlaces importantes na medida de RSSI. (MACHADO, 2023) . . . . .                       | 59 |
| Figura 6.5 – Tabela de enlaces. . . . .                                                             | 59 |
| Figura 6.6 – Valores RSSI ao longo do tempo, com quatro e dois operadores (MACHADO, 2023) . . . . . | 60 |
| Figura 6.7 – Desvio padrão com quatro e dois operadores (MACHADO, 2023). . . . .                    | 61 |
| Figura 6.8 – Porcentagem dos estados da máquina (MACHADO, 2023). . . . .                            | 62 |
| Figura 6.9 – Comportamento temporal do estado da máquina (MACHADO, 2023). . . . .                   | 62 |
| Figura 6.10–Medição de corrente do motor de arrasto (MACHADO, 2023) . . . . .                       | 63 |

# Lista de Abreviações e Siglas

|            |                                                      |
|------------|------------------------------------------------------|
| ABNT       | Associação Brasileira de Normas Técnicas             |
| BIG DATA   | Gerenciamento de grande volume e velocidade de dados |
| CLP        | Controle Lógico Programável                          |
| GTW        | Gateway                                              |
| IA         | Inteligência Artificial                              |
| IIoT       | Industrial Internet of Things                        |
| IoT        | Internet of Things                                   |
| KPI        | Key Performance Indicator                            |
| LAN        | Local Area Network                                   |
| MIDDLEWARE | Software intermediário                               |
| MoT        | Management over Tunneling                            |
| PMEs       | Pequenas e médias empresas                           |
| PoC        | Proof of Concept                                     |
| RSSF       | Rede de Sensores sem Fio                             |
| RSSI       | Received Signal Strength Indicator                   |
| SMARTGRID  | Rede elétrica inteligente                            |
| TI         | Tecnologia da Informação                             |
| TpM        | Three Phase Methodology                              |
| TpM-PRO    | The Three Phase Methodology for Project Development  |

# Sumário

|          |                                                                                      |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                    | <b>15</b> |
| 1.1      | Discussões preliminares                                                              | 15        |
| 1.2      | Objetivos                                                                            | 17        |
| 1.3      | Estrutura da dissertação                                                             | 17        |
| 1.4      | Artigo resultante desse trabalho                                                     | 18        |
| <b>2</b> | <b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>                                                        | <b>19</b> |
| 2.1      | Trabalhos sobre <i>retrofit</i> na indústria                                         | 19        |
| 2.2      | Comparação do presente trabalho com os trabalhos relacionados                        | 25        |
| <b>3</b> | <b>THREE PHASE METHODOLOGY - PRO</b>                                                 | <b>27</b> |
| 3.1      | Fases                                                                                | 27        |
| 3.1.1    | Fase 1: Entendendo o Negócio                                                         | 27        |
| 3.1.2    | Fase 2: Coleta de Requisitos                                                         | 29        |
| 3.1.3    | Fase 3: Implementação                                                                | 30        |
| 3.1.4    | Conclusão                                                                            | 30        |
| <b>4</b> | <b>A TPM-PRO APLICADA AO RETROFIT</b>                                                | <b>31</b> |
| 4.1      | Estrutura da Indústria                                                               | 31        |
| 4.1.1    | Nível de Empreendimento                                                              | 32        |
| 4.1.2    | Nível de Fábrica                                                                     | 33        |
| 4.2      | TpM-PRO com <i>Retrofit</i>                                                          | 34        |
| 4.2.1    | Fase 1: Entendendo as novas demandas e as deficiências que motivam o <i>retrofit</i> | 34        |
| 4.2.2    | Fase 2: Levantamento dos requisitos no Contexto de <i>Retrofit</i>                   | 36        |
| 4.2.3    | Fase 3: Implementação do <i>Retrofit</i>                                             | 37        |
| 4.2.4    | Diferenças do <i>Retrofit</i> para uma solução IoT convencional                      | 38        |
| 4.3      | Conclusão                                                                            | 40        |
| <b>5</b> | <b>ESTUDO DE CASO</b>                                                                | <b>41</b> |
| 5.1      | Fase 1: Entendendo o Negócio                                                         | 41        |
| 5.1.1    | Análise do Negócio                                                                   | 41        |
| 5.1.2    | Etapas do <i>retrofit</i> na análise do negócio                                      | 42        |
| 5.1.3    | Regras de negócio                                                                    | 44        |
| 5.1.4    | Solução IoT                                                                          | 45        |
| 5.1.5    | Relatório da análise do <i>Retrofit</i>                                              | 45        |

|     |                                                          |    |
|-----|----------------------------------------------------------|----|
| 5.2 | Fase 2: Levantamento dos requisitos . . . . .            | 49 |
| 5.3 | Fase 3: Implementação . . . . .                          | 51 |
| 5.4 | Conclusão . . . . .                                      | 56 |
| 6   | RESULTADOS DA PROVA DE CONCEITO . . . . .                | 57 |
| 6.1 | Armazenamento dos dados coletados . . . . .              | 57 |
| 6.2 | Resultados sobre a movimentação dos operadores . . . . . | 58 |
| 6.3 | Resultados sobre o estado da máquina . . . . .           | 61 |
| 6.4 | Conclusão . . . . .                                      | 63 |
| 7   | CONCLUSÃO . . . . .                                      | 64 |
|     | REFERÊNCIAS . . . . .                                    | 66 |

# 1 Introdução

## 1.1 Discussões preliminares

A indústria tem passado por uma evolução significativa nos últimos anos, impulsionada pelos constantes avanços na eletrônica e nos meios de comunicação. Com o surgimento da Internet das Coisas, inúmeras iniciativas estão sendo desenvolvidas para integrar a filosofia da inovação no coração da indústria. Este movimento transformador é conhecido como a Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0.(SANTOS; LEME; JUNIOR, 2020)

O conceito de Indústria 4.0 levou ao desenvolvimento da Internet das Coisas Industrial (Industrial Internet of Things - IIoT), que integra avanços em computação e sensores proporcionados pela IoT (ver Figura 1.1). Isso impulsiona a criação de fábricas inteligentes, onde o ambiente de produção é totalmente inserido nesse contexto com mínima interferência humana, conectividade entre fábricas, desenvolvimento de plataformas de gerenciamento e análise, além de simuladores de ambiente para previsões de longo prazo e monitoramento e controle produtivos abrangentes (SANTOS; LEME; JUNIOR, 2020).

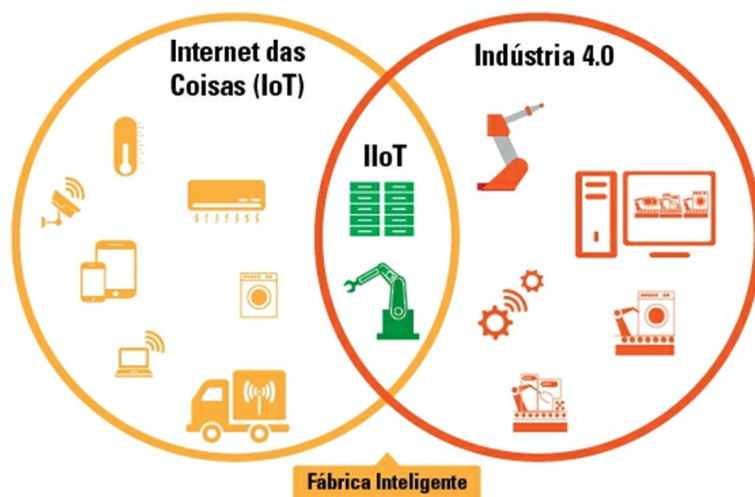


Figura 1.1 – Correlação entre IoT, Indústria 4.0 e IIoT. (SANTOS; LEME; JUNIOR, 2020)

No entanto, a adoção dos conceitos de Indústria 4.0 e IIoT pode exigir investimentos consideráveis, uma vez que a Indústria 4.0 representa uma transformação completa ao incorporar soluções de IIoT. Esse processo frequentemente resulta em custos elevados para desenvolver ou substituir sistemas legados. Embora a transformação seja tecnicamente viável, muitas empresas, especialmente pequenas e médias, possuem plantas industriais antigas que ainda entregam o produto final com eficiência. Nessas situações,

substituir o legado por completo pode ser inviável devido aos altos custos. Além disso, esses sistemas industriais em geral são duráveis, já integrados aos processos da empresa e, muitas vezes, foram desenvolvidos internamente e otimizados para atender às necessidades específicas do negócio.

Contudo, no atual cenário de evolução industrial e com a chegada da IIoT, aumenta a demanda por controle produtivo, redução de custos e fluxo ampliado de dados. Isso expõe algumas desvantagens das plantas legadas, como lacunas na produtividade, paralisações momentâneas, demora na resolução de problemas e limitações na predição de melhorias em segurança, qualidade e manutenção. Esses sistemas exigem mais controle manual, aumentam o retrabalho, atrasam prazos de produção e dificultam a análise de falhas.

Nesse contexto de plantas industriais legadas, o conceito de *Retrofit* surge como uma solução viável. Trata-se de uma modernização da infraestrutura e maquinário para integrar novas tecnologias e aprimorar o sistema existente, sem o substituir completamente. O objetivo dessa modernização é trazer melhorias em segurança, prolongar a vida útil dos sistemas e reduzir os custos operacionais. Há diversos tipos de *Retrofit* na indústria, incluindo os estruturais, mecânicos, energéticos, elétricos, ambientais, de segurança, de telecomunicações e de TI. Neste trabalho, o termo *Retrofit* refere-se às soluções IIoT aplicadas a plantas industriais legadas.

No Brasil e em vários outros países, muitas indústrias ainda dependem de maquinário legado, desprovido das funcionalidades essenciais da IIoT e carecendo de sistemas de gerenciamento integrados. Essa situação impede essas empresas de usufruírem dos benefícios da Indústria 4.0. O principal desafio na modernização reside na inviabilidade econômica de substituir toda a infraestrutura legada por nova, totalmente equipadas com funcionalidades IIoT.

A transição do legado para a IIoT exige uma abordagem sistemática. Atualmente, muitas empresas desenvolvem soluções de forma independente, resultando na falta de sinergia entre os seus diferentes setores. As tecnologias são frequentemente implementadas sem o suporte de uma metodologia específica de desenvolvimento de soluções, dificultando a implementação de uma estratégia abrangente de integração IIoT.

Assim, o presente estudo propõe a adoção da Metodologia de Três Fases para desenvolvimento de projeto IoT (*Three phase Methodology* - TpM-PRO) (FERREIRA et al., 2022) aplicada ao processo de *Retrofit* de maquinário legado. A TpM-PRO é uma metodologia oriunda da TpM concebida para ensino (FERREIRA et al., 2019), mas adaptada para projeto de soluções IoT. A TpM-PRO oferece soluções escaláveis por meio de sua estratégia segmentada ao longo das fases do projeto. A metodologia é composta por três fases: entendimento do negócio, definição dos requisitos, e implementação. Sua aplicação ao nível empresarial facilita uma abordagem integrada, envolvendo todos os

setores industriais na transição para a IIoT.

## 1.2 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é propor e demonstrar a adequação do uso da metodologia TpM-PRO no *Retrofit* de maquinário legado. As fases dessa metodologia serão revisadas, destacando as especificidades do processo de *Retrofit* que necessitam de tratamento especial.

Para ilustrar a aplicação da metodologia TpM-PRO, este trabalho apresenta um protótipo de *Retrofit* não invasivo em uma máquina de uma indústria metal-mecânica. Esse protótipo integra equipamentos industriais legados a um sistema de monitoramento em tempo real, utilizando uma rede de dados. O principal objetivo é permitir o acompanhamento do desempenho da produção e antecipar melhorias na planta por meio do monitoramento contínuo dos ciclos operacionais e da movimentação dos operadores nos diferentes turnos. A indústria metal-mecânica relatou que, sem um sistema de monitoramento *online*, certos processos enfrentam lacunas de informações e dependem da inserção manual de dados de produção.

A abordagem priorizou melhorias operacionais sem alterar os processos de fabricação, destacando a relevância da IIoT para a eficiência industrial. A dissertação organiza-se de modo a demonstrar a eficácia de uma solução de IIoT, por meio de um *Retrofit*, para atender às necessidades de monitoramento de uma planta industrial legada.

## 1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 - Discute quatro estudos encontrados na literatura sobre *Retrofit* com soluções IoT, abordando a fundamentação teórica e as abordagens adotadas.
- Capítulo 3 - Apresenta a metodologia TpM-PRO para o desenvolvimento de soluções IoT e sua estruturação na indústria.
- Capítulo 4 - Descreve a aplicação da metodologia TpM-PRO ao processo de *Retrofit* Industrial, destacando as etapas específicas dentro do estudo de negócio.
- Capítulo 5 - Apresenta o estudo de caso de *Retrofit* desenvolvido em uma empresa do setor metal-mecânico.
- Capítulo 6 - Apresentar os resultados da prova de conceito desenvolvida, com a análise dos dados obtidos.



- Capítulo 7 - Traz um resumo dos principais achados e sugestões para pesquisas futuras.

## 1.4 Artigo resultante desse trabalho

O seguinte artigo foi publicado com os resultados deste trabalho:

Andrei Tchepurnoy Machado, Renan Yamaguti, Raphael Montali Assumpção, Omar Carvalho Branquinho, Paulo Cardieri, “Application of Three-Phase Methodology for Retrofit 4.0 in Legacy Industrial Plants”, *The IARIA Annual Congress on Frontiers in Science, Technology, Services, and Applications*, 2023.

## 2 Trabalhos Relacionados

Nesse capítulo, são apresentados trabalhos encontrados na literatura que tratam do problema de *retrofit* na indústria.

### 2.1 Trabalhos sobre *retrofit* na indústria

O estudo de (FORCELLINI, 2019) descreve um processo de *retrofitting* aplicado a um equipamento para alinhá-lo à Indústria 4.0 e satisfazer as necessidades dos clientes. O exemplo utilizado é uma máquina de torrefação de café, onde o controle preciso de temperatura é crucial. O artigo apresenta dois métodos: um para o processo produtivo corporativo e outro para o desenvolvimento da solução. O *Retrofit* é realizado utilizando metodologias de atualização de tecnologia e um método de fases voltado ao projeto e implementação. O trabalho atinge seu objetivo ao exemplificar o *retrofitting* em um equipamento, integrando-o à Indústria 4.0 e atendendo às demandas dos clientes. Em cinco ciclos, são destacadas soluções alinhadas com a Indústria 4.0, utilizando uma abordagem de ciclos curtos. Uma solução específica é apresentada para atender à demanda por controle dinâmico e automático da temperatura, utilizando um *dimmer* digital, entrada de dados via wi-fi e armazenamento da curva de temperatura na máquina de torrefação.

A concepção da solução utiliza a metodologia PDP (Plano de Desenvolvimento de Produto) ciclo Toyota, que inclui: planejamento (definição de escopo, viabilidade econômica e prazos), Projeto Informacional (especificações), Projeto Conceitual (solução), Projeto Detalhado (definição de especificações, materiais e finalização dos processos), Preparação da Produção (especificações do processo produtivo) e Lançamento do Produto (venda, suporte e distribuição).

Os principais KPIs (*Key Performance Indicator*) a serem controlados e monitorados são: secagem, cor e sabor do café, resfriamento e controle de temperatura, incluindo temperatura do ar e do grão, temperatura do ponto de viragem e início do desenvolvimento do sabor. A gestão adequada da torrefação inclui controle dinâmico e automático de temperatura.

O projeto foi dividido em ciclos conforme a metodologia aplicada:

*Ciclo 1* - Reprodução automática da curva de temperatura contra tempo de torrefação, abordando a condição atual e a meta, com foco no desenvolvimento do sistema. Analogamente a TPM-PRO, o ciclo 1 aborda a compreensão do negócio, a situação atual da máquina e a meta futura, como a solução IoT.

*Ciclo 2* - Incorporação de funcionalidades à solução IoT para controle de

temperatura e tempo. No ciclo 2, similarmente a TpM-PRO, foram investigados os principais requisitos a serem modificados para o processo e consideradas soluções alternativas.

*Ciclo 3* - No ciclo 2, foram identificadas 17 soluções alternativas para as funções requeridas de controle de temperatura através da IoT, incluindo controle, curva e armazenamento de dados. Os KPIs incluem controle automático de temperatura e tempo de torrefação conforme as curvas do processo. No ciclo 3, diversas soluções foram apresentadas para seleção da mais adequada. Na perspectiva da TpM-PRO, este ciclo estaria na fase inicial de negócio e solução IoT, otimizando os passos subsequentes.

*Ciclo 4* - Análise e seleção da melhor solução entre as possíveis. Este ciclo, considerado desnecessário do ponto de vista da TpM-PRO, já teria sido definido na fase inicial com mais detalhes, como estudo de viabilidade, benefícios, regras de negócio e solução IoT.

*Ciclo 5* - Implementação conceitual e prototipagem da solução escolhida, seguida pela implementação.

O trabalho demonstrou controle automático em tempo real durante o ciclo de torrefação, sem intervenção humana, destacando a eficiência da automação e monitoramento em cada etapa. O *Retrofit* foi minimamente invasivo, substituindo o controle manual de temperatura por um dimmer digital e um controlador de temperatura, ambos com interface Wi-Fi.

De maneira crítica e detalhada, o trabalho de ([FORCELLINI, 2019](#)) emprega a metodologia do ciclo Toyota. Apesar de ser ampla e consolidada, essa metodologia não é especificamente voltada para soluções IoT, sendo mais adequada ao desenvolvimento de produtos manufaturados. Nesse contexto, a metodologia carece de uma fase mais profunda de análise e entendimento do negócio, como o detalhamento dos requisitos e a conectividade Wi-Fi, sendo essa podendo ser problemática em ambientes fabris com alta taxa de erro. Em termos de Indústria 4.0, a abordagem do TPM-PRO é mais concisa e abrange diversas etapas preliminares na fase inicial de entendimento do negócio, essenciais para vislumbrar uma solução IoT abrangente para a indústria em geral, não apenas para o planejamento e solução de um equipamento específico. Além disso, o estudo de viabilidade e a justificativa detalhada da solução adotada não foram abordados de maneira clara.

Do ponto de vista do TPM-PRO, a abordagem em ciclos para desenvolver uma solução IoT é desnecessária em certos aspectos, segmentando muitas etapas já incluídas nas fases iniciais. Todos os cinco ciclos realizados poderiam ser integrados e distribuídos na fase inicial do TPM-PRO, otimizando o projeto e estabelecendo uma base sólida para a elaboração e implementação de soluções IoT industriais, reduzindo a fragmentação e concentrando-se em objetivos pertinentes ao entendimento do empreendimento e da fábrica, definindo o tipo de solução IoT e considerando a viabilidade técnica e econômica

do processo de *Retrofit*. Após isso, as fases de levantamento de requisitos e implementação seriam incorporadas de maneira mais linear, ao invés de espalhadas como mostrado, com processos no meio do caminho, mais apropriados nas etapas iniciais conforme descrito acima, existindo um certo retrabalho de vai e volta entre as etapas.

A discussão sobre conectividade e tecnologia é superficial, sem explorar detalhadamente as variáveis ambientais envolvidas e a razão pela qual uma tecnologia específica foi escolhida. A conectividade Wi-Fi apresenta altas taxas de erro e não é recomendada para soluções IoT industriais. O processo todo no TPM-PRO é bem definido nas fases iniciais, desde a idealização da solução até a tomada de decisão e o levantamento de requisitos nas fases subsequentes.

A abordagem metodológica no processo de modernização IIoT apresenta algumas falhas mencionadas anteriormente, o que pode resultar em falta de alinhamento de informações, custos adicionais e retrabalho, devido à falta de clareza nos processos e à estruturação insuficiente da análise do negócio. A metodologia empregada nem sempre serve como base para soluções IoT e *Retrofit*.

O trabalho apresentado por (LIMA; MASSOTE; MAIA, 2019) aborda a transição da indústria para a chamada Indústria 4.0, destacando conceitos como Gêmeos Digitais, Internet das Coisas (IoT) e interoperabilidade de equipamentos legados. Um dos focos mais importantes deste trabalho é mostrar como as pequenas e médias empresas (PMEs) podem se beneficiar ao adotar novas tecnologias. O estudo apresenta o *Retrofit* de uma máquina usando sensores de medição de energia e um gateway IoT, que conecta tudo à nuvem. Isso permite que os dados de consumo de energia sejam acompanhados em tempo real. Para facilitar essa conexão, usamos o software Node Red para gerenciar a comunicação, e também desenvolvemos um aplicativo móvel que torna simples o monitoramento dos dados.

Em um exemplo prático, foi feita a atualização de uma máquina CNC antiga com a instalação de sensores de energia. Além disso, os dados coletados passaram a ser virtualizados, ajudando a entender e melhorar o desempenho energético da fabricação. Aqui, a capacidade de visualizar o consumo em tempo real é essencial, já que o consumo de energia é o principal indicador de desempenho (KPI) analisado.

O trabalho também discute os desafios que as PMEs enfrentam ao tentar adotar tecnologias da Indústria 4.0, e destaca a importância de virtualizar processos e equipamentos para aumentar a eficiência. Toda a aplicação foi desenvolvida por equipes em laboratórios de fabricação digital e IoT, mostrando uma solução viável para modernizar processos industriais de forma prática e acessível. Para desempenho energético da máquina (consumo) e foco em virtualização dos dados para possíveis outras aplicações, foi feita análise da máquina CNC e estudo do processo. Viu-se a necessidade de monitorar o consumo energético da planta CNC, condição não invasiva.

Após o estudo, criou-se uma solução IoT utilizando sensor de energia, arquitetura de conectividade e definida a Plataforma de gerenciamento. O trabalho foi executado em forma de PoC no laboratório para validação da solução.

A solução baseia-se na virtualização dos dados de desempenho energética coletados via sensor de energia e Plataforma de gerenciamento mais aplicativo móvel. A Plataforma analisa o consumo, tempo de funcionamento e falhas. Os indicadores “operando”, “standby” e o tempo de transição entre processos, refletem os diferentes padrões de consumo e incorpora um algoritmo de IA, que estimam o consumo de energia de uma oficina padrão conforme suas características. Foi Utilizado um sensor tag na máquina que envia dados wireless (zigbee protocol). Na abstração, foram extraídos gráficos de operação e máquina parada.

Os resultados foram o controle de consumo, operação de maquinário e predição para correções energéticas, além da melhoria do fator de potência.

A metodologia aplicada, na verdade, foi um processo criado para reprodução da solução IoT de medição de energia de uma máquina CNC em laboratório, ou seja, uma PoC em laboratório. Tal abordagem é válida, mas novamente caímos em ação técnica pontual de processo, na modernização específica de determinado legado daquela indústria. O método empregado ilustra uma solução IoT de monitoramento energético da máquina, sem detalhes do negócio, do tipo de *Retrofit*, das variáveis de ambiente e do porquê da escolha, dentre outras, da solução confeccionada. Também não traz um detalhamento no levantamento de requisitos em todos os seus níveis, como na Tpm-PRO, tão qual na implementação e na designação de conectividade, pois mais de uma solução poderia atender ao proposto. O trabalho realizado, apesar de seu valor, carece de um método consolidado na modernização de uma planta fabril. Utiliza-se uma abordagem nem sempre aderente ao desenvolvimento de soluções IIoT, podendo gerar obstáculos antes e durante a implementação.

O trabalho apresentado por (Keshav Kolla et al., 2022) propõe uma arquitetura simples para atualizar uma máquina antiga com sensores externos, permitindo a coleta de dados para análise em nuvem. Essa arquitetura é testada em um ambiente de laboratório em uma máquina de perfuração sem sensores embutidos. Os dados de velocidade da broca e profundidade do furo são coletados usando os novos sensores para validar a proposta. O trabalho descreve uma arquitetura de IIoT para *retrofitting* de máquinas antigas, visando a modernização acessível para PMEs. Utiliza sensores de baixo custo, Raspberry Pi e software aberto. Embora enfrentando desafios na seleção de hardware, busca criar uma solução mais amplamente aplicável, especialmente para PMEs que buscam adotar a Indústria 4.0. O objetivo futuro é expandir o sistema para análise de dados e conectividade em nuvem. A estrutura do trabalho inclui uma arquitetura genérica para *retrofitting* de máquinas antigas e sua possível implementação em um ambiente de laboratório. O trabalho foi realizado

na forma de PoC em laboratório. Os KPIS abordados foram a velocidade da broca e a profundidade do furo. O trabalho se divide nas seguintes etapas:

*Etapa 1-* Análise de ambiente das empresas PMEs que não estão preparadas com viabilidade de *Retrofit*.

*Etapa 2- Survey* da infraestrutura das máquinas e ambiente para atualização. Pesquisa exaustiva das possíveis soluções IoT considerando viabilidades técnicas e econômicas.

*Etapa 3-* Aplicação de uma arquitetura genérica em *Retrofit* na fábrica, já com a solução pré-definida.

Foi definida a arquitetura padrão da solução IoT e analisada a necessidade de upgrade da infraestrutura das máquinas e do ambiente, caso necessário. O upgrade inclui sensoramento, integração digital e uma solução não invasiva com CLP e microcontroladores para processamento e transmissão dos dados coletados. Estabeleceu-se comunicação via GTW, implementação de rede de pacotes e protocolos de conversão. Os dados coletados são armazenados em bancos de dados e enviados para análise usando software baseado na web ou dispositivos de computação locais.

O trabalho aborda uma solução técnica de *Retrofit* sem uma metodologia definida, em que foi designado um setor para modernização. Após análise e *survey* da planta, realizou-se uma PoC laboratorial específica para um determinado maquinário, novamente sendo uma solução isolada de *Retrofit*, sem apresentar um estudo do negócio detalhado e do tipo de *Retrofit*, das vantagens da solução adotada dentre outras, ausência de abordagem em níveis, sem localizar com precisão as fases do projeto. A partir da PoC, o protótipo serve de base para futura expansão. A principal problemática no trabalho realizado foi o processo de abordagem, como a não coesão das áreas, falta do detalhamento das etapas e do estudo do negócio no campo de viabilidades e detalhes do porquê da solução IoT de *Retrofit* escolhida, além de não englobar toda a planta industrial e suas diversas aplicações, podendo não servir para uma futura expansão em outras áreas.

O trabalho de (MORAES et al., 2022) faz uma análise da mineração no Brasil envolvendo PMEs, e com maiores ganhos as grandes empresas com minerais de alto valor. Para poder comercializar, o minério passa antes pelos processos de seleção e moagem, separando os minérios de maior interesse. A cominuição e, em especial, a moagem são os processos mais caros e sofrem mais com a baixa qualidade do minério devido à escassez com materiais mais duros e abrasivos, exigindo processos melhores de moagem, mais fina e maior quantidade, aumentando consideravelmente os custos. Segundo (MORAES et al., 2022), a indústria 4.0 desempenha um papel fundamental, vista como solução para minimizar os problemas e aumentar a eficiência, para diminuição dos custos operacionais, além da escolha dos equipamentos corretos. Principalmente na moagem de bolas, a escolha

correta de equipamentos com ferramentas de moagem mais duras e controle das variáveis produtivas minimizam os custos e melhora a eficiência energética. O trabalho ressalta a importância da digitalização dos processos, inserindo o setor no contexto 4.0.

O objetivo do trabalho é o *Retrofit* de uma planta de moagem como protótipo, desenvolvendo um sistema para o processo de moagem de minério de ferro como instrumentação e coleta de dados, modelagem de previsão do desgaste de bolas na moagem e criação de um protótipo de planta inteligente. O *Retrofit* e a modernização permitirão que a planta opere de forma eficiente, com controle aprimorado da alimentação de minério de ferro e monitoramento das principais variáveis do processo. Isso inclui a reforma e readequação de equipamentos, operação autônoma e uso de técnicas avançadas de comunicação e tratamento de dados. Para isso, utilizou-se modelo 5C de (LEE; BAGHERI; KAO, 2015) composto por: conexão Inteligente, Conversão Dados-Informação, Sistema Virtual, Análise de Big Data e Camada de Serviço. Esse modelo passou a ser chamado de DTDL-CPS e aplicado ao processo de moagem.

O modelo 5C constitui 5 camadas piramidal e divide-se começando pela base em camada de conexão, conversão de dados para informação, camada de sistema virtual, camada de análise de big data e camada de serviço.

*Os Pacotes de Trabalho:* (MORAES et al., 2022) dividiu o processo em 4 pacotes de trabalho, sendo eles:

*Instrumentação e coleta de dados:* Instrumentação para aquisição de dados dos KPIs de fluxo de minério, potência e rotação do moinho, pressão e densidade.

*Simulação e modelagem:* Quantificação do desgaste das bolas de moagem, considerando diversas variáveis pertinentes ao minério e operacionais, mediante ensaios de desgastes dos componentes de moagem.

*Controle de processo autônomo e inteligente:* Infraestrutura para indústria 4.0, incluindo soluções IoT e análise de big data com IA.

*Sistema de comunicação:* Redes sem fio e sistemas celulares 5G.

O *Retrofit* proporciona um alto ganho no controle do processo de moagem no campo da difusão das informações da parte fabril para a área gerencial e do controle em tempo real. O armazenamento em Big Data dos processos permitiu o desenvolvimento de um modelo de predição de desgaste das ferramentas de moagem e uma implementação de um controle inteligente de processos através da tecnologia de IA. O *Retrofit* de (MORAES et al., 2022) realizou um estudo no entendimento do negócio e de viabilidade e possui abordagem abrangente no processo de moagem de minérios, utilizando um modelo técnico de 5 camadas 5C para a solução IoT, podendo ser aplicado a diferentes setores da indústria.

Apesar da adoção de um modelo de solução IoT abrangente, foi criada uma



metodologia de 4 planos de trabalho adaptada do de 5 camadas em atender a parte técnica da solução, segmentada das demais problemáticas e análises de projeto, ou seja, o artigo concentra seus esforços na solução IoT através dessa metodologia, sendo essa uma parte do projeto total.

Podemos concluir que, apesar de sua abrangência e adoção de um modelo consolidado na confecção da solução IoT, faz-se necessária uma metodologia de maior alcance, aderente para soluções IIoT incluindo aspectos econômicos, gerenciais e técnicos, com coesão de todos os processos e ações otimizadas. A criação dos 4 planos de trabalho, torna-se um retrabalho da 5C que poderia ser evitado via outro método. A abordagem pode não ser aderente a outros legados para soluções IoT, daí vem a importância da engenharia de métodos. (FERREIRA et al., 2022)

## 2.2 Comparação do presente trabalho com os trabalhos relacionados

Os trabalhos citados contemplam processos de *Retrofit* de maquinário legado, seja em laboratório ou na linha de produção. Nota-se, entre outros aspectos, que o *Retrofit* é um processo amplamente buscado por muitas indústrias, especialmente pelas PMEs, devido ao seu ganho tecnológico na inserção do legado à indústria 4.0. A rede de sensores sem fio desempenha um papel fundamental nesse contexto, dada a sua eficiência e facilidade de implementação.

Apesar do sucesso reportado nos trabalhos discutidos na Seção 2.1, eles foram ações pontuais sem o uso de uma metodologia padrão consolidada para o desenvolvimento de projetos de soluções IoT em qualquer tipo de planta fabril. As abordagens nem sempre servem de base para outros projetos, havendo a necessidade de formular métodos novos para atender às demandas de projeto, além de retrabalhos no estudo de viabilidades e outros fatores críticos. Sem um fluxo conciso, o projeto tende a gerar custos adicionais e retrabalhos, podendo até ser cancelado.

Em todos os casos relatados, a ênfase foi mais na parte técnica, sem um estudo adequado do negócio. Uma exceção foi em (MORAES et al., 2022), que focou nos estudos em um problema de maior abrangência. Isso mostra, de modo geral, que os trabalhos foram mais voltados para um *Retrofit* de manutenção para determinadas linhas produtivas e não necessariamente para um projeto de *Retrofit* de maior alcance no empreendimento. Além disso, três dos cinco trabalhos foram realizados como prova de conceito em laboratório, ainda na fase de estudo de futura expansão. No geral, não houve um estudo detalhado do negócio e dos requisitos, especialmente no tipo de solução adotada e na conectividade, apresentando uma segmentação excessiva das etapas, criando um fluxo “poluído” de informações.

A aplicação de *Retrofit*, por meio da adaptação da TpM-PRO representa uma



abordagem inovadora e robusta, especialmente voltada para projetos IoT, com potencial de escalabilidade para empresas de diferentes portes e setores industriais. A inserção das particularidades de um *Retrofit* adaptado numa metodologia consolidada proporciona maior abrangência integrativa e atende lacunas enfrentadas por indústrias que necessitam modernizar seu legado sem substituir completamente sua infraestrutura existente. Nenhum dos trabalhos relacionados apresentou uma abordagem semelhante.

### 3 Three phase Methodology - PRO

A *Three phase Methodology* (TpM-PRO) (FERREIRA et al., 2022) segmenta o desenvolvimento de soluções IoT em três fases, conforme ilustrado na Figura 3.1, onde estão destacados também os agentes envolvidos no processo e suas interações. Na sequência,

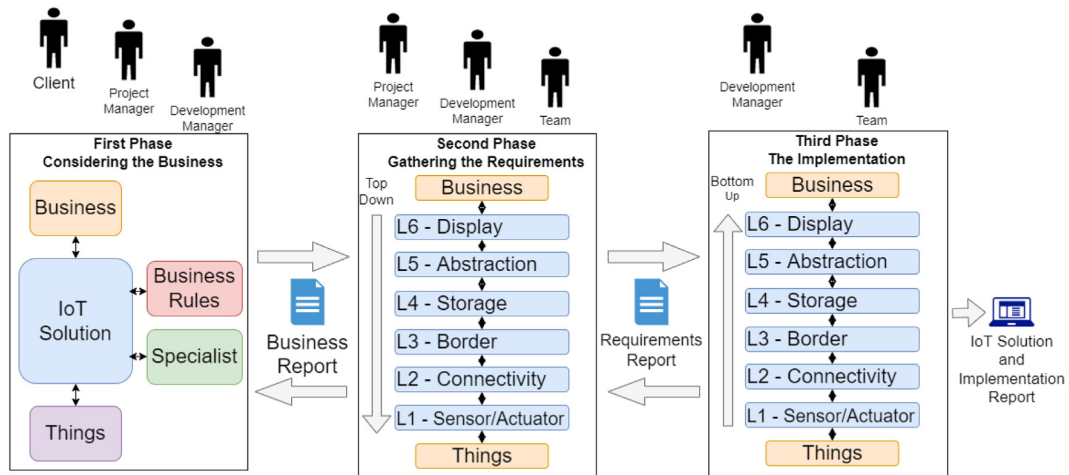


Figura 3.1 – Metodologia TpM e seus agentes (FERREIRA et al., 2022).

as três fases são descritas brevemente.

#### 3.1 Fases

##### 3.1.1 Fase 1: Entendendo o Negócio

Nessa fase, são estabelecidos os fundamentos para uma solução IoT, com um detalhamento do negócio e uma identificação das necessidades, utilizando como base um modelo de referência em seis níveis (GREEN; GROUP, 2014). Esse entendimento é essencial para garantir que as expectativas do cliente sejam plenamente atendidas. A análise do negócio envolve a compreensão dos seguintes componentes:

- Negócio: varia conforme o projeto, considerando suas particularidades para atender às necessidades finais.
- Coisas: objetos de interesse que podem ser medidos, controlados e quantificados, definidos pelo gerente de projeto.
- Especialista: equipe de profissionais que fornecem informações para a viabilidade do negócio.

- Regras de negócio: restrições e pontos críticos da operação do negócio, alinhadas com as necessidades do cliente e a solução IoT.

Ao final da Fase 1, um relatório, denominado Tpm-IoT-Canvas, deve ser elaborado (FERREIRA et al., 2022). Esse relatório é uma ferramenta que apresenta os principais pontos críticos da solução IoT e facilita o alinhamento do projeto com a equipe. O relatório sintetiza toda a análise da fase 1 e aborda três questões principais:

- Por quê? Define a área de aplicação, justifica a solução, seus objetivos e benefícios. Identifica as necessidades do cliente e como atender os pontos críticos.
- O quê? Detalha a solução, as entidades monitoradas e os requisitos. Seriam as coisas e seus obstáculos a serem superados pelo desenvolvimento.
- Quem? Define os responsáveis e o processo de avaliação do projeto, como desenvolvedores especialistas em diferentes disciplinas para integração da solução.

A Figura 3.2 ilustra um exemplo do relatório de negócios no contexto de monitoramento de máquinas rotacionais. O relatório é organizado em diferentes seções, que abordam os aspectos principais de um projeto, servindo como norteador para as próximas fases.

As seções são basicamente definidas como:

- **Negócio:** descreve o atendimento do negócio.
- **Produto:** definição da solução IoT teórica para realizar o monitoramento.
- **Cliente:** descreve o tipo de cliente interessado na solução.
- **Justificativa:** o porquê da solução, as principais necessidades de se desenvolver tal projeto.
- **Coisas:** o que será monitorado e suas grandezas.
- **Equipe:** são os profissionais necessários para o desenvolvimento do projeto.
- **Benefícios:** são os ganhos relacionados à implementação da solução.
- **Requisitos da solução:** descreve, de forma sintética, as especificações da solução IoT.

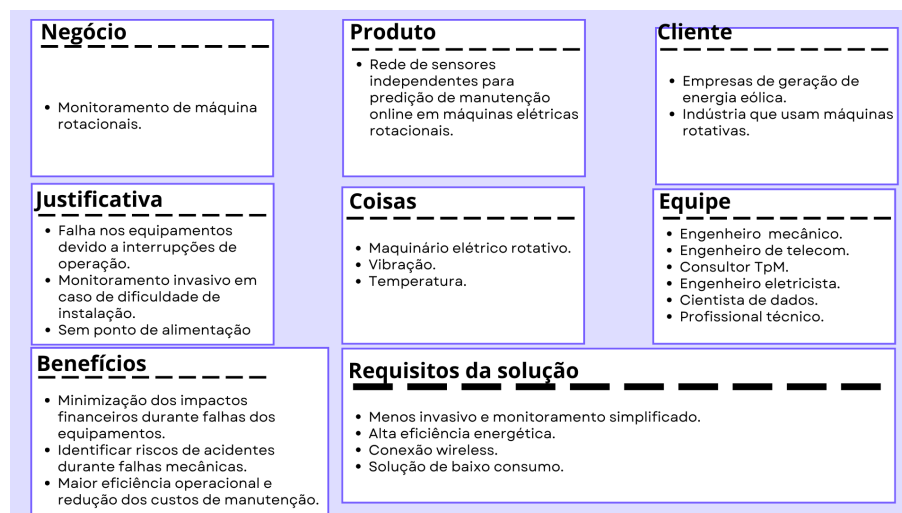


Figura 3.2 – Relatório TpM-IoT-Canvas (FERREIRA et al., 2022).

### 3.1.2 Fase 2: Coleta de Requisitos

A coleta de requisitos para a solução IoT levanta as informações necessárias para dar embasamento para a implementação da solução. Nessa fase, não se fala em tecnologias, apenas em requisitos funcionais e não funcionais da solução. Os requisitos são organizados em seis níveis: exibição, abstração, armazenamento, borda, conectividade e sensores. As informações coletadas devem ser documentadas por nível, como descrito a seguir:

- **Nível 1 - Nó Sensor/Atuador (*Sensors/Actuators*):** Dispositivos que coletam, processam e transmitem dados. Definição do tipo de dispositivo, capacidade de processamento, grandezas a serem monitoradas e componentes adicionais.
- **Nível 2 - Conectividade (*Connectivity*):** Como as coisas serão interconectadas (rede cabeada ou sem fio). Escolha da tecnologia baseada em custos, viabilidade física e quantidade de grandezas monitoradas. Crucial para o desempenho da rede, com impacto direto na abstração e exibição dos dados.
- **Nível 3 - Borda (*Border*):** Características do elemento concentrador ou elemento de borda. Funções de integração, comunicação, segurança e gerenciamento da troca de mensagens.
- **Nível 4 - Armazenamento (*Storage*):** Como os dados serão armazenados (localmente ou na nuvem). Tipo de hardware e software de armazenamento, segurança da informação e redundância.
- **Nível 5 - Abstração (*Abstraction*):** Extração dos dados armazenados para exibição. Definição dos dados relevantes a serem monitorados e quantificados. Uso de ferramentas de software e inteligência artificial.

- Nível 6 - Exibição (*Display*): Apresentação dos dados ao usuário final (gráficos, estatísticas e alarmes). Interface direta com o usuário em tempo real e históricos. Na parte de segurança, a TpM-PRO atende em cada nível, sendo cada um com sua especificação coletada e definida na fase 2 de requisitos.

### 3.1.3 Fase 3: Implementação

Nesta fase, a solução IoT é implementada. São escolhidas as técnicas e tecnologias mais adequadas, baseadas na fase anterior (coleta de requisitos). A implementação é realizada abordando todos os níveis, de baixo para cima (*bottom up*), desde o nível de sensores até a exibição dos dados.

- Nível 1 - Nó de Sensor/Atuador: Escolha e desenvolvimento dos sensores/atuadores e especificações de hardware.
- Nível 2 - Conectividade: Tipo de rede, dispositivos de comunicação, protocolos e infraestrutura para conectar sensores ao elemento de borda.
- Nível 3 - Borda: Tipo de elemento concentrador, como computador local ou servidor em nuvem.
- Nível 4 - Armazenamento: Estratégia de armazenamento, seja local ou em nuvem.
- Nível 5 - Abstração: Técnica de extração e gerenciamento de dados, como big data ou aprendizado de máquina.
- Nível 6 - Exibição: Ferramentas para mostrar os dados abstraídos ao usuário final, como aplicativos ou websites.

### 3.1.4 Conclusão

Esse capítulo apresentou de forma breve a TpM-PRO, que será empregada nos próximos capítulos no desenvolvimento e implementação de um projeto de *Retrofit*. A estrutura do TpM-IoT-Canvas orienta o desenvolvimento da solução IoT alinhada às necessidades do cliente, criando um fluxo segmentado em níveis detalhados em seus aspectos técnicos, abordados de forma organizada e consistente, que garante uma solução escalável e confiável. A TpM-PRO esclarece cada fase do projeto, com base sólida e escalonável na modernização de sistemas legados, se mantendo relevante à medida que as necessidades industriais mudam.

## 4 A TpM-PRO Aplicada ao *Retrofit*

Este capítulo descreve a aplicação da metodologia TpM-PRO no *Retrofit* de máquinas.

### 4.1 Estrutura da Indústria

Este trabalho propõe uma abordagem que combina uma metodologia para o desenvolvimento de soluções de IoT, a TpM-PRO, com a estrutura industrial delineada por (GROOVER, 2010). Essa estrutura industrial é dividida em *Nível Empresarial*, responsável pela gestão estratégica, e *Nível de Fábrica*, onde os processos de produção e controle de qualidade ocorrem, conforme mostrado na Figura 4.1

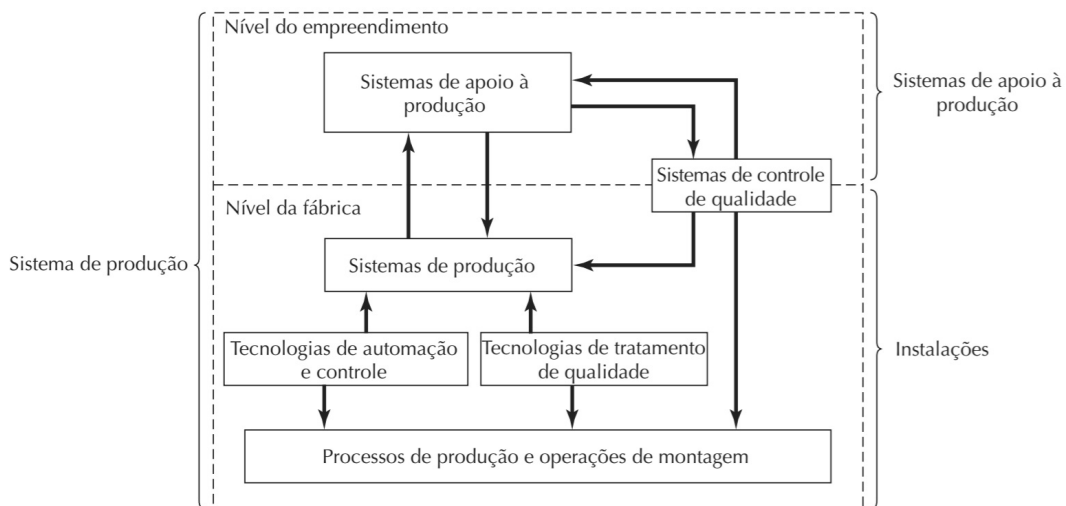


Figura 4.1 – Divisão do sistema produtivo proposto por (GROOVER, 2010).

(GROOVER, 2010) demonstra a importância da sinergia de consolidar e aplicar os elementos decisórios para mudanças, em que soluções industriais sempre devem partir primeiramente do nível de empreendimento, para posterior fusão com o nível de fábrica. Isso fundamenta as bases de desenvolvimento na modernização na indústria.

Podemos aplicar essa divisão proposta por (GROOVER, 2010) na estrutura de fases e níveis da metodologia TpM-PRO. A Figura 4.2 mostra essa divisão incorporada na TpM-PRO, segmentando os níveis de empreendimento e fábrica, incluídos de forma análoga nas divisões da metodologia.

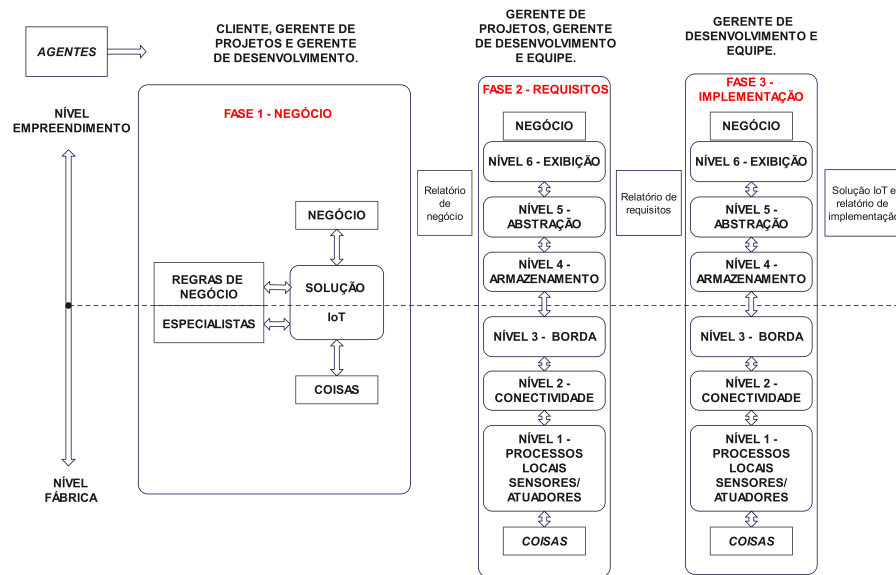


Figura 4.2 – TpM-PRO com a divisão proposta por (GROOVER, 2010).

De fato, na estrutura de níveis da TpM-PRO, há uma clara divisão entre níveis relacionados ao Nível de Empreendimento e os níveis associados ao Nível de Fábrica. Essa divisão indica uma separação de responsabilidades e atividades ao longo do processo de desenvolvimento da solução IoT. Na sequência, a estrutura da TpM-PRO será revisitada à luz da divisão proposta por (GROOVER, 2010).

#### 4.1.1 Nível de Empreendimento

O nível de Empreendimento abrange os níveis mais altos do sistema, focando na análise e no uso dos dados para tomada de decisões empresariais. Na fase 1 da TpM-PRO adaptada para sistemas produtivos, esse nível engloba os estudos e decisões envolvendo o negócio, como, por exemplo, as regras que devem ser obedecidas, conforme demonstrado na Figura 4.2. A adaptação baseou-se na divisão do Groover e será explicada na seção 4.2 e sub-seções 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4.

Já nas fases 2 e 3, o nível de Empreendimento inclui:

- **Nível 4 – Armazenamento** Este nível, que faz parte do empreendimento, lida com o armazenamento dos dados processados provenientes dos níveis mais baixos (nível de fábrica). Aqui, os dados coletados são armazenados em um local centralizado, seja em servidores locais ou na nuvem, prontos para serem utilizados nas camadas superiores de abstração e exibição.
- **Nível 5 – Abstração** Nesse nível, os dados armazenados são processados e transformados em informações ou modelos abstratos que facilitam a análise e interpretação

dos dados brutos. É um nível voltado à geração de *insights* e padrões que podem ser usados para decisões estratégicas.

- Nível 6 – Exibição: Este é o nível mais alto no empreendimento, onde as informações são apresentadas em forma de *dashboards*, relatórios ou visualizações compreensíveis como gráficos. A exibição dos dados é fundamental para a tomada de decisões pelos gerentes e outros agentes de negócio.

Os agentes do Nível de Empreendimento incluem o cliente, o gerente de projetos, o gerente de desenvolvimento e outros tomadores de decisão. São os agentes que interagem mais diretamente com os níveis de armazenamento (Nível 4), abstração (Nível 5) e exibição (Nível 6), onde os dados são usados para fins de análise e visualização.

#### 4.1.2 Nível de Fábrica

O nível de fábrica lida com a captura de dados e sua transmissão para os níveis superiores, começando no nível mais baixo, que é diretamente relacionado aos dispositivos físicos. Assim, nesse nível, durante a Fase 1, atuam os especialistas, que são profissionais que têm conhecimento tanto do negócio como da parte técnica. Como já discutido no Capítulo 3, os especialistas incluem engenheiros, analistas de dados e consultores de negócio, conectando a parte técnica às metas estratégicas.

Nas fases 2 e 3 da TpM-PRO, o Nível de Fábrica inclui os seguintes níveis:

- Coisas: As coisas referem-se aos dispositivos físicos no contexto de IoT, como maquinário, ambiente, dispositivos elétricos e eletrônicos, infraestrutura, motores, caldeiras, tanques e demais componentes ou infraestrutura existentes. Neles, são coletados dados do ambiente ou são executadas ações, sendo a base do nível de fábrica, gerando informações que serão processadas e usadas em níveis superiores para tomadas de decisão.
- Nível 1 – Processos Locais, Sensores/Atores: Envolve os sensores e atuadores que coletam os dados do ambiente físico e realizam ações de controle. Este é o ponto inicial da interação com as coisas no contexto de IoT.
- Nível 2 – Conectividade: Esse nível garante que os sensores e dispositivos conectados possam transmitir dados para os níveis superiores. Inclui redes de comunicação e protocolos que asseguram o transporte de dados.
- Nível 3 – Borda: O nível de borda processa os dados localmente como concentrador, sendo interface da rede de sensores. Isso ajuda a reduzir a latência e a quantidade de dados que precisa ser enviada ao nível de armazenamento central. A borda realiza um pré-processamento dos dados.



Os agentes no Nível de Fábrica são a equipe técnica e o gerente de desenvolvimento, responsáveis pela implementação e manutenção dos níveis de processos locais (Nível 1), conectividade (Nível 2) e borda (Nível 3). Na seção 4.2 e suas subseções, são abordadas as particularidades do *retrofit*, assim como suas principais etapas, contextualizados em cada fase.

## 4.2 TpM-PRO com *Retrofit*

O processo de implementação de uma solução de *Retrofit*, bem como de soluções IoT, deve começar com uma avaliação abrangente no nível de empreendimento, conforme representado na Figura 4.2. Essa avaliação envolve agentes fundamentais, como cliente, gerente de projetos e gerente de desenvolvimento, que trabalham juntos na primeira fase do processo, identificada como Fase 1 - Negócio. Essa fase é central na metodologia TpM-PRO, pois é quando são tomadas as decisões estratégicas para garantir que o projeto seja de uma solução de IoT. Na questão de *Retrofit*, existem etapas que devem ser incorporadas nessa fase para haver um alinhamento com o negócio da organização, ou seja, a TpM-PRO é ponto de partida nessa análise preliminar, onde são considerados todos os pontos críticos na definição de um *Retrofit* dentro da solução IoT.

No entanto, o projeto de um *Retrofit* apresenta algumas peculiaridades que o diferenciam do projeto de uma solução de IoT, em particular na fase 1 da metodologia TpM-PRO. Nesta seção, as fases da TpM-PRO serão revisitadas sob a perspectiva do uso dessa metodologia adaptada para o projeto de um *Retrofit*.

### 4.2.1 Fase 1: Entendendo as novas demandas e as deficiências que motivam o *retrofit*

A Fase 1 da TpM-PRO, quando aplicada em *Retrofit*, deve ser faseada para abordar de maneira mais eficiente as peculiaridades desse tipo de projeto. Essas etapas são discutidas a seguir.

#### Etapas *Retrofit*

1. **Necessidade do *Retrofit*:** O *Retrofit* de uma máquina é motivado pela identificação de deficiências operacionais da máquina ou pela necessidade de atender a novas demandas da empresa. As deficiências operacionais, em geral, são percebidas pelo pessoal que opera a máquina (Nível de Fábrica), enquanto novas demandas são levantadas pela cadeia gerencial (Nível de Empreendimento). Independentemente da origem da necessidade do *Retrofit*, a primeira etapa do processo deve ser a descrição precisa daquilo que se espera daquela máquina após o *Retrofit*.

2. **Viabilidade de *Retrofit*:** A viabilidade do *Retrofit* de uma máquina deve ser avaliada em diferentes aspectos:

- **Econômico:** O custo das alterações necessárias na máquina não deve ser custo superior ao de uma máquina nova que já atenda as necessidades que motivaram o *Retrofit*.
- **Tecnológico:** As tecnologias necessárias para a implementação do *Retrofit* devem ser maduras e adequadas para o ambiente de operação da máquina.
- **Interrupção da operação:** os efeitos da interrupção da operação da máquina para a implementação do *Retrofit* devem ser avaliados.
- **Benefícios:** O *Retrofit* só é viável se agregar valor ao negócio e se adaptar ao contexto técnico, permitindo a integração com a Indústria 4.0 sem grandes impactos ou alterações. Portanto, os benefícios efetivos do *Retrofit* precisam ser avaliados, ao menos qualitativamente.

A importância relativa de cada um desses aspectos dependerá do caso em questão, e deverá ser quantificada conjuntamente pelos Níveis de Empreendimento e de Fábrica.

3. **Estudo da planta fabril:** Essa etapa consiste no estudo e análise do ambiente produtivo, da operação e funcionamento das máquinas, da segmentação dos diferentes processos, da rotina de produção e demais equipamentos relevantes para o *Retrofit*. Nessa etapa é necessário detalhar e entender toda dinâmica industrial, e fornecer elementos para a avaliação da viabilidade e das características do *Retrofit*.

4. **Limitações:** Consiste em identificar as limitações que possam dificultar a implementação do *Retrofit*, mesmo com o estudo de viabilidades favorável.

5. **Natureza do *Retrofit* – Invasivo ou não:** Dependendo das deficiências a serem corrigidas ou das novas demandas que a máquina deve atender, o *Retrofit* pode ser implementado de duas formas:

- *Retrofit* invasivo: aplicado quando são necessárias intervenções mais profundas. Inclui alterações elétricas e mecânicas, modificações de software, instalação de novos dispositivos, e ajustes no ambiente ou na rotina de produção. Essa forma de *Retrofit* pode exigir que a máquina interrompa a sua produção, o que pode ser inviável.
- *Retrofit* não invasivo: nesse caso, a máquina passa por pouca ou nenhuma intervenção, pois as novas demandas podem ser atendidas por mecanismos implementados externamente. Envolve monitoramento de grandezas como consumo de energia e detecção de grandezas que não requeiram alteração do maquinário legado.

Vale destacar que o tratamento dessas questões exige conhecimento das regras de negócio e dos objetivos do *Retrofit*, devendo, portanto, ser conduzido por membros dos Níveis de Empreendimento e de Fábrica.

O resultado do estudo conduzido nessa Fase deve compor o “Relatório de Negócio” (ver 3.2), usado na Fase 2 da Tpm-PRO adaptada para *Retrofit*.

#### 4.2.2 Fase 2: Levantamento dos requisitos no Contexto de *Retrofit*

Durante a fase de definição de requisitos, o *Retrofit* é planejado com base em uma análise detalhada do sistema legado. Nessa etapa, são definidos os elementos que precisam ser modernizados e como ocorrerá a integração com novas tecnologias, de modo a atender às novas demandas ou eliminar as deficiências identificadas na Fase 1. A seguir, os níveis do modelo de referência são discutidos do ponto de vista de seus requisitos de *Retrofit*.

- **Nível 6: Exibição (Empreendimento):** No contexto de *Retrofit*, a exibição envolve a necessidade de apresentar dados relevantes extraídos de máquinas antigas de maneira acessível e compreensível para os gestores. Requisitos aqui incluem a necessidade de interfaces modernas, *dashboards* e relatórios que permitam uma visualização clara de dados que as máquinas legadas anteriormente não forneciam.
- **Nível 5: Abstração (Empreendimento):** As máquinas antigas, ao serem retro-fitadas, geram novos dados que precisam ser processados. O requisito de abstração está relacionado a como os dados dos sensores serão processados e transformados em informações úteis. O *retrofit* define como os dados brutos, provenientes de sensores instalados nas máquinas legadas, serão convertidos em *insights* úteis.
- **Nível 4: Armazenamento (Empreendimento/Fábrica):** O *Retrofit* exige a capacidade de armazenar dados que as máquinas legadas não coletavam anteriormente. O desafio aqui é implementar sistemas de armazenamento adequados para reter dados tanto de máquinas antigas como de máquinas novas, permitindo a análise futura, controle histórico e otimização dos processos de fábrica.
- **Nível 3: Borda (Fábrica):** No contexto de *Retrofit*, os dispositivos de borda precisam ser instalados para processar dados localmente nas máquinas antigas. O requisito de borda define como as máquinas legadas vão interagir com novos dispositivos IoT para processar dados em tempo real, minimizando a necessidade de enviar tudo para a nuvem.
- **Nível 2: Conectividade (Fábrica):** O *Retrofit* exige a adição de mecanismos de conectividade em máquinas que antes não possuíam essa capacidade. Os requisitos

aqui envolvem, por exemplo, a adição de redes sem fio, protocolos de comunicação e outros meios de conectar as máquinas antigas a um sistema moderno de IoT. O mecanismo de conectividade (p.ex., rede sem fio ou rede cabeada) escolhido deve satisfazer o tipo de *Retrofit* desejado quanto à invasividade.

- Nível 1: Processos locais, sensores e atuadores (Fábrica): Aqui, o *Retrofit* define quais sensores e atuadores precisam ser instalados ou adaptados nas máquinas legadas. O requisito básico é que as máquinas antigas sejam equipadas com sensores modernos que monitorem variáveis como temperatura, vibração, energia consumida, etc., sem modificar significativamente a estrutura física da máquina. Como no nível anterior, a forma de coleta das medidas ou de atuação escolhida deve satisfazer o tipo de *Retrofit* desejado quanto à invasividade.

### 4.2.3 Fase 3: Implementação do *Retrofit*

Na fase de implementação, os requisitos definidos na fase anterior são transformados em ações concretas, com escolha das tecnologias a serem adotadas para atenderem os requisitos e a respectiva instalação e integração.

- Nível 6: Exibição (Empreendimento): Durante a implementação do *Retrofit*, as interfaces de exibição são criadas. Aqui, são desenvolvidos *dashboards* e relatórios que visualizam dados coletados de máquinas legadas após o *Retrofit*. Isso permite que os gestores no nível de empreendimento possam monitorar de forma eficaz as máquinas antigas que agora estão integradas ao sistema de IoT.
- Nível 5: Abstração (Empreendimento): O *Retrofit* exige que os dados provenientes dos sensores nas máquinas legadas sejam processados para gerar "*insights*". Na fase de implementação, são configurados sistemas de abstração que processam os dados em informações úteis, como análise de desempenho, detecção de falhas e otimização de processos, mesmo para equipamentos mais antigos.
- Nível 4: Armazenamento (Empreendimento/Fábrica): A implementação do *Retrofit* inclui o estabelecimento de sistemas de armazenamento para dados gerados por sensores instalados em máquinas legadas. Esses sistemas armazenam dados para análises futuras, incluindo a criação de históricos de operação das máquinas que anteriormente não tinham essa capacidade.
- Nível 3: Borda (Fábrica): Na implementação do *Retrofit*, dispositivos de borda concentradores são instalados nas máquinas antigas. Esses dispositivos processam dados localmente, filtrando e enviando apenas informações críticas para níveis superiores. Eles permitem que as máquinas antigas funcionem em sincronia com os

sistemas de IoT modernos, sem depender exclusivamente de conexões constantes com servidores centrais.

- **Nível 2: Conectividade (Fábrica):** Durante a implementação do *Retrofit*, são configurados os sistemas de conectividade, como redes sem fio e protocolos de comunicação, que permitem que as máquinas legadas se comuniquem com o resto do sistema IoT. Aqui, as máquinas antigas, que não possuíam conectividade, são integradas a redes modernas de transmissão de dados.
- **Nível 1: Processos locais, sensores e atuadores (Fábrica):** O *Retrofit* envolve a instalação de sensores e atuadores em máquinas legadas. Na fase de implementação, esses dispositivos são fisicamente instalados e calibrados nas máquinas antigas para monitorar variáveis como consumo de energia, vibração, temperatura, etc., integrando-os ao sistema de controle da fábrica.

### Resumo das Fases 1, 2 e 3 com *Retrofit*

- Na Fase 1 (Entendendo o Negócio), os focos são (i) entender as novas demandas ou as deficiências que a máquina apresenta, (ii) avaliar a viabilidade do *Retrofit* com relação a diversos aspectos. Esse estudo envolve os níveis do Empreendimento e de fábrica.
- Na fase 2, os requisitos de *Retrofit* são detalhados para identificar as melhorias necessárias para atender as novas demandas e sanar as deficiências, modernizando o maquinário. Nessa fase, consideram-se as limitações das máquinas antigas e a forma de integração dos novos sensores e sistemas a elas.
- Na Fase 3, esses requisitos são transformados em realidade com a escolha das tecnologias e implementação dos sistemas.

#### 4.2.4 Diferenças do *Retrofit* para uma solução IoT convencional

A principal diferença entre o *Retrofit* e uma solução de IoT normal está nos objetivos, escopo e abordagem de implementação. Nesta seção, vamos analisar essas diferenças.

##### 1. Objetivo Principal

- *Retrofit*: O objetivo do *Retrofit* é modernizar maquinário legado (antigo) ainda em operação, mas que carece de capacidades de monitoramento modernos. Ele visa integrar essas máquinas antigas a tecnologias atuais (Indústria 4.0)

sem a necessidade de substituí-las ou realizar grandes modificações. Esse cenário específico impõe restrições além daquelas normalmente encontradas no desenvolvimento de soluções IoT típicas.

- Solução IoT: uma solução IoT normal é projetada para resolver problemas em novas máquinas ou sistemas que já são compatíveis com IoT, ou seja, já têm sensores e conectividade embutidos. O foco é otimizar um sistema já preparado para ser conectado e monitorado em rede.

## 2. Invasividade

- *Retrofit*: No *Retrofit*, a implementação pode ser invasiva ou não invasiva. Isso significa que a modernização pode envolver desde pequenas alterações, como a instalação de sensores sem fio, até grandes mudanças, como modificações elétricas, eletrônicas e mecânicas.
- IoT Normal: Em uma solução IoT normal, o sistema IoT geralmente já faz parte da estrutura da máquina, e não há a necessidade de ajustes invasivos, já que a máquina foi projetada para ser conectada desde o início.

## 3. Complexidade de Integração

- *Retrofit*: O *Retrofit* exige uma análise detalhada de viabilidade técnica e econômica, especialmente porque envolve maquinário antigo que pode não ser compatível com soluções modernas de forma nativa. A integração ao ambiente de Indústria 4.0 deve ser feita com cuidado para garantir que o *Retrofit* agregue valor sem causar grandes impactos negativos.
- IoT Normal: Em uma solução IoT normal, a integração é mais direta, pois o equipamento já é preparado para se comunicar com redes e dispositivos IoT, e os sensores e sistemas de conectividade já estão embutidos nas máquinas.

## 4. Flexibilidade na Aplicação

- *Retrofit*: Um *Retrofit* visa modernizar o que já existe, trazendo uma nova vida útil ao maquinário. Ele é flexível porque pode ser implementado em máquinas e sistemas que não foram projetados para serem conectados, permitindo que empresas adotem IoT sem substituir equipamentos caros.
- IoT Normal: Uma solução IoT normal é geralmente aplicada em novos equipamentos que já possuem a tecnologia necessária para se conectar. Isso torna o processo de implementação mais fácil, mas menos flexível em relação ao maquinário antigo.

## 5. Custo e Tempo de Implementação

- *Retrofit*: O *Retrofit* tende a ser mais econômico do que a substituição total do maquinário, uma vez que aproveita o equipamento existente. No entanto, dependendo do grau de invasividade, pode exigir mais tempo para análise de viabilidade, integração e ajustes na planta.
- IoT Normal: Soluções IoT normais em máquinas novas podem ter um custo inicial mais alto, já que requerem máquinas com tecnologia integrada, mas, em contrapartida, a implementação tende a ser mais rápida, pois não há a necessidade de adaptar máquinas antigas.

#### 6. Independência da Rede do Cliente.

- *Retrofit*: No *Retrofit*, há uma preocupação em não utilizar a rede LAN do cliente, o que indica uma abordagem mais independente e autônoma para evitar sobrecargas ou questões de segurança relacionadas à infraestrutura existente.
- IoT Normal: Soluções IoT convencionais podem depender da rede local do cliente (LAN) para transmitir dados para a nuvem ou servidores centrais, exigindo uma infraestrutura de TI robusta.

## 4.3 Conclusão

A principal diferença entre o *Retrofit* descrito e uma solução IoT normal é que o *Retrofit* é uma solução voltada para modernizar máquinas antigas, adicionando capacidades de IoT a equipamentos que não foram projetados para isso. Já a solução IoT normal se aplica principalmente a máquinas novas ou prontas para conectividade IoT. O *Retrofit* é mais focado na adaptação e flexibilidade, com uma abordagem não invasiva quando possível, enquanto a IoT normal é mais fácil de integrar em ambientes que já possuem equipamentos modernos preparados para conectividade e monitoramento em tempo real. A relação entre os Níveis de Empreendimento e Fábrica é fundamental para o sucesso de uma solução IoT integrada. O nível de fábrica (níveis 1 a 3 da Tpm-PRO) lida com a captura de dados do mundo físico por meio de sensores e atuadores, com a conectividade e o processamento local na borda. Além disso, esse nível envolve ações conduzidas pelo pessoal técnico, que conhece os detalhes dos processos. Já o Nível de Empreendimento (níveis 4 a 6 da Tpm-PRO) utiliza esses dados para armazenamento, processamento mais abstrato e, finalmente, exibição de *insights* para a tomada de decisões estratégicas. As pessoas envolvidas nesse nível, embora não conheçam os detalhes técnicos dos processos, possuem uma visão ampla de todo o sistema e de sua relação com outros processos. Elas têm poder de decisão e utilizam os dados obtidos nas etapas do Nível de Fábrica para embasar suas escolhas.

## 5 Estudo de Caso

Uma Prova de Conceito (*PoC*) foi realizada para avaliar o uso da TpM-PRO em *Retrofit*, tomando-se um problema real enfrentado por uma empresa do setor metal-mecânico com seu maquinário legado. Nesse capítulo, as etapas da TpM-PRO são aplicadas para o projeto do *Retrofit* desse maquinário.

### 5.1 Fase 1: Entendendo o Negócio

#### 5.1.1 Análise do Negócio

Após uma análise abrangente do setor de atuação da empresa e da configuração de sua planta industrial, foi conduzida uma reunião presencial para aprofundar o entendimento dos desafios enfrentados. Durante a visita à planta fabril, foram mapeados problemas específicos e oportunidades de melhoria. A empresa em questão é uma indústria metal-mecânica, com foco na produção de ferramentas de corte de precisão. A Figura 5.1 ilustra os produtos e segmentos de atuação dessa empresa.



Figura 5.1 – Área de atuação da indústria no estudo de caso.

A unidade estudada é especializada na fabricação de ferramentas perfurantes, essenciais para diversas aplicações industriais. A visita permitiu uma avaliação direta dos processos de produção e das condições operacionais, fornecendo *insights* valiosos para a implementação de soluções mais eficazes e alinhadas com as necessidades da planta.

Durante reuniões com os gerentes da empresa objeto de estudo, identificou-se a falta generalizada de monitoramento automático e em tempo real da linha de produção, particularmente no setor de retífica de chanfros. Este setor foi escolhido pela empresa



porque é o mais antigo da fábrica. O controle atual é realizado por meio da entrada manual de dados pelos operadores em terminais distribuídos pela fábrica. No final de cada lote, o operador registra e finaliza o processo, iniciando o próximo. Os dados são então armazenados em um servidor e acessíveis mediante um sistema de consulta, que atua como um inventário de produção. Apesar de ser útil, o sistema está longe do ideal.

Esses dados não são inseridos e monitorados em tempo real e só ficam disponíveis para consulta após alguns dias. Além disso, há lacunas nos registros de produção, com omissões que não indicam o que levou a certas interrupções ou quedas no desempenho produtivo.

O departamento de retífica de chanfro foi escolhido como ponto focal para a prova de conceito. O cliente solicitou como prototipagem a verificação da abordagem metodológica e implementação de um *Retrofit* para dois indicadores de desempenho *KPIs* no setor legado de retífica de chanfro. Sendo assim, surgiram as seguintes motivações:

- Motivação 1: monitorar o ciclo de uma máquina dentro do setor com o KPI de máquina “em ciclo” e “parada”.
- Motivação 2: monitoramento em tempo real do movimento dos operadores dentro do mesmo setor da fábrica

A Figura 5.2 mostra a máquina em questão e a peça retificada.



Figura 5.2 – Máquina RD6 retífica de chanfro.

### 5.1.2 Etapas do *retrofit* na análise do negócio

#### Viabilidade

O nível gerencial da empresa identificou que monitorar o ciclo das máquinas, tanto em funcionamento quanto paradas, assim como a movimentação dos operadores,

contribuirá significativamente para o controle e predição produtiva. Este foco em *Retrofit* abre novas possibilidades para a implementação de uma solução IoT mais abrangente. Apesar da eficiência da planta legada, composta por máquinas robustas e sofisticadas, projetadas há mais de trinta anos e com baixo custo de manutenção, há necessidade de aprimorar o controle produtivo e a aquisição de dados. Assim, do ponto de vista do empreendimento, o *Retrofit* se revela como uma solução viável tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. O maquinário legado comporta uma modernização e integração de hardware, software e ambiente, baseada no tipo de maquinário e linha de produção, sem quaisquer empecilhos para isso.

O estudo mostrou-se tecnicamente viável e a integração de legado foi aprovada pela área gerencial. Com o *Retrofit* preliminarmente autorizado para estudo, as etapas de análise foram realizadas para comprovar essa viabilidade.

### Estudo da Planta fabril

Com o auxílio de dois funcionários da empresa, um estudo foi realizado no setor legado de retífica de chanfro para entender a rotina de trabalho do setor, detalhar o maquinário e verificar os ciclos de funcionamento das máquinas, identificando os elementos que indicam se estão em ciclo ou parada. Os turnos são os seguintes: quatro operadores das 7h00 às 17h30, dois operadores das 17h30 às 21h30 e quatro operadores das 21h30 às 6h20, sendo a operação como montagem da peça na máquina e acionamento. O tempo de retífica é em torno de 30 segundos, sendo a montagem da peça na máquina de aproximadamente 60 segundos. O setor possui a seguinte disposição, conforme mostra a Figura 5.3.

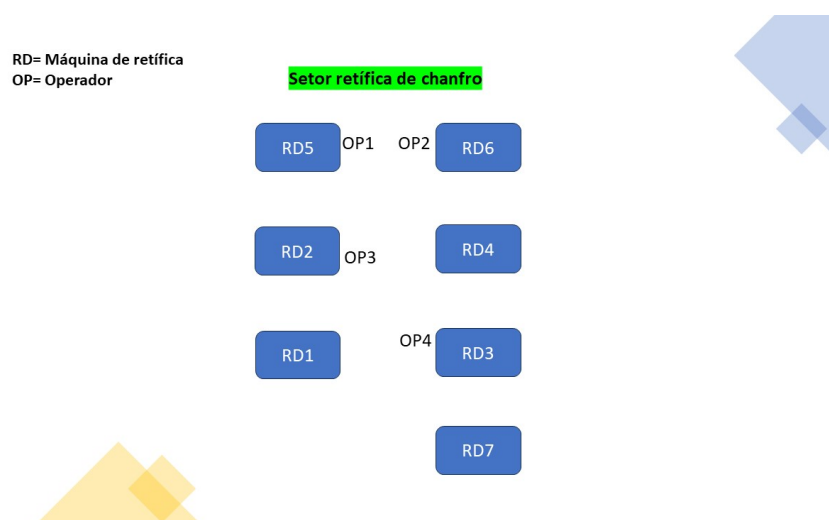


Figura 5.3 – Setor de retífica de chanfro.

### Limitações do *retrofit*

As limitações são as condições proibitivas definidas pelo cliente, sendo elas interferências na produção e modificações na rotina de trabalho, como, por exemplo, alterar qualquer tipo de parâmetro produtivo, tempo de execução, mudança de operadores e planejamento.

Dentre as condições proibitivas, destacam-se modificações de ambientes físicos internas ou externas das máquinas, alteração de layout, parte externa das máquinas como mudança de posição de painéis de comando, colocação de suportes ou qualquer outro acessório externo. Além disso, o ambiente não suporta cabeamento nem interconexão com a rede LAN da empresa ou integração com plataformas existentes.

Por fim, foi proibido também reprogramar/instalar software, alterar hardware ou equipamento dentro de painéis de comando, ou interações eletro-eletrônicas com a automação das máquinas, como, por exemplo, a colocação de CLP.

Para a motivação 1, referente à monitoração dos estados de “em ciclo” e “parada” da máquina, há três motores AC em operação: o primeiro motor movimenta a plataforma, o segundo aciona o rebolo, e o terceiro, conhecido como motor de arrasto, faz girar a peça que será retificada. Este último motor é ativado manualmente pelo operador após a instalação da peça, o que torna a corrente elétrica do motor de arrasto um indicador confiável dos estados de “em ciclo” e “parada” da máquina.

Na motivação 2, relacionada à monitoração do movimento dos operadores no setor, propõe-se o uso de uma rede sem fio distribuída pelo ambiente, que permite medir variações nos sinais de radiofrequência (RF) recebidos em pontos específicos da região. As flutuações na potência do sinal RF refletem a movimentação dos operadores ao longo dos diferentes turnos de trabalho.

### Tipo do *retrofit*

Devido às limitações e às especificações dos KPIs, foi possível e mais adequado o *Retrofit* não invasivo para concretizar a solução IoT, via sensoriamento da máquina e ambiente. O estudo descrito estabelece as especificações do tipo de *Retrofit* e consta no relatório de negócios.

#### 5.1.3 Regras de negócio

As “coisas” são entidades essenciais para atingir os objetivos do negócio, podendo ser físicas (como temperatura, umidade) ou dispositivos eletrônicos (como relés, câmeras). Nesta etapa, foi definido o maquinário de retífica de chanfro a ser usado na solução de IoT, mais especificamente uma máquina como protótipo, guiando a especificação e implementação dos sensores/atuadores do projeto.

As regras de negócio, além de seguir as recomendações listadas nas limitações e atender os objetivos das duas motivações, respeitam as diretrizes essenciais da empresa e processo produtivo, incluindo confidencialidade. Inclui também qualquer tipo de dano na máquina, a condição de ser um protótipo para uma somente, sem integração com a rede LAN e seguir os protocolos de confidencialidade.

#### 5.1.4 Solução IoT

A solução IoT consistiu em utilizar uma rede de sensores sem fio para cobertura e transmissão de dados com elemento de borda concentrador e armazenamento externo, sem utilizar a rede do cliente. As duas motivações da *Retrofit* foram atendidas como descrito a seguir:

**Motivação 1 – monitoração dos estados “em ciclo” e “parada” da máquina.**

Notou-se que há três motores AC em operação: o primeiro motor movimenta a plataforma, o segundo aciona o rebolo, e o terceiro, conhecido como motor de arrasto, faz girar a peça que será retificada. Este último motor é ativado manualmente pelo operador após a instalação da peça, o que torna a corrente elétrica do motor de arrasto um indicador confiável dos estados de “em ciclo” e “parada” da máquina. Portanto, para atender à motivação 1, a corrente do terceiro motor foi medida utilizando-se um sensor de corrente, monitorando os ciclos da máquina.

**Motivação 2 – monitoração do movimento dos operadores no setor.**

Conforme citado anteriormente na seção sobre as *Limitações do Retrofit*, as variações de RSSI refletem a movimentação dos operadores, obtendo-se uma estimativa do número de operadores em que tais flutuações de RF geram padrões de propagação.

#### 5.1.5 Relatório da análise do *Retrofit*

Depois da análise do negócio, as coisas, viabilidade do *Retrofit*, tipo de *Retrofit*, limitações, estudo da planta fabril, regras do negócio e concepção de uma solução IoT, todas essas informações deverão estar sintetizadas no relatório de negócios na ferramenta Canvas. O resultado da Fase 1 sintetizado nesse relatório, será a base do levantamento dos requisitos da solução a ser implementada.

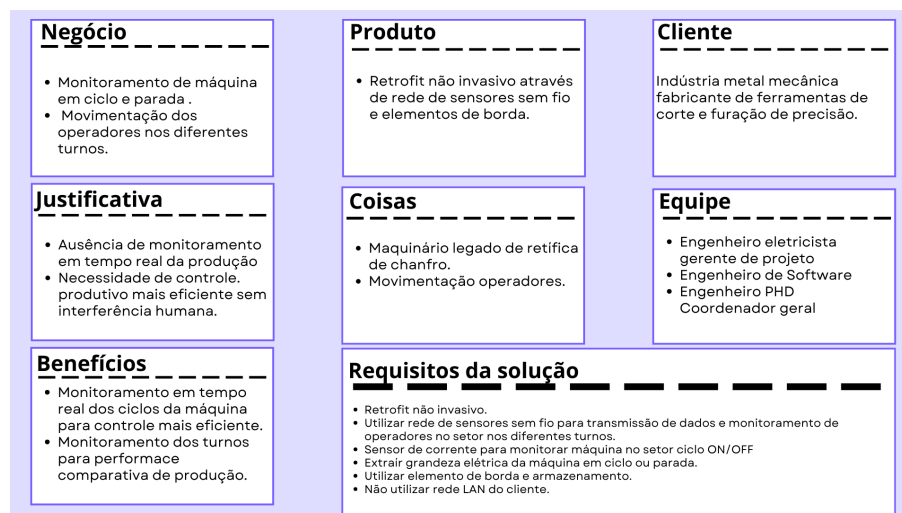


Figura 5.4 – Diagrama Canvas da Fase 1.

A seguir, o conteúdo do relatório no caso estudado é descrito em detalhes.

## Cliente

Trata-se de uma indústria metal-mecânica especializada na fabricação de ferramentas de corte e furação de alta precisão, utilizadas em processos de fabricação com elevados requisitos de qualidade e exatidão. O monitoramento em tempo real e a otimização dos processos são essenciais para garantir o desempenho ideal, e a solução proposta visa assegurar que tanto as ferramentas quanto o processo produtivo operem com a máxima eficiência possível.

## Problemas enfrentados pela empresa, justificativas

- Ausência de monitoramento em tempo real da produção: atualmente, o cliente não tem uma forma eficaz de monitorar em tempo real o que acontece no chão de fábrica. Isso significa que há um atraso na identificação de problemas, como falhas em equipamentos ou outras questões relacionadas à produção. A ausência desse monitoramento pode resultar em tempos de inatividade mais longos, menor produtividade e uma incapacidade de reagir rapidamente a mudanças no processo.
- Necessidade de controle produtivo mais eficiente sem interferência humana: Isso destaca que o controle atual da produção depende na maioria da intervenção humana, o que pode ser ineficiente e suscetível a erros. A automatização do processo de monitoramento traria benefícios significativos, como decisões mais rápidas baseadas em dados e uma redução na necessidade de supervisão manual.

## Negócio

- Monitoramento de máquina em ciclo e parada: este item sugere que o foco do negócio é implementar um sistema de monitoramento contínuo e automatizado. Ele permitirá acompanhar o estado das máquinas, tanto quando estão operando quanto quando estão paradas. O objetivo aqui é aumentar a eficiência geral, como reduzir o tempo de inatividade, melhorar o controle da produção e identificar possíveis problemas antes que eles se agravem.
- Movimentação dos operadores nos diferentes turnos: O sistema também deverá ter a capacidade de monitorar a rotina do setor, identificando o número de operadores e suas interações com o maquinário ao longo dos turnos. Essa informação poderá ser utilizada para otimizar a alocação de recursos humanos, melhorar a segurança do trabalho e identificar áreas de treinamento necessárias visando maximizar a eficiência da produção.

## Produto

Implementação de um *Retrofit* não invasivo utilizando uma rede de sensores sem fio e dispositivos de borda. A abordagem não invasiva permite evitar intervenções significativas, mantendo as máquinas em operação com mínima interrupção durante a instalação do sistema de monitoramento. O uso da rede de sensores sem fio elimina a necessidade de cabeamento e de grandes modificações no ambiente de trabalho, facilitando a integração da solução ao processo produtivo existente.

## Benefícios

- Monitoramento em tempo real dos ciclos da máquina para controle mais eficiente: com o monitoramento em tempo real, a equipe pode observar o desempenho da máquina ao longo de seus ciclos operacionais. Isso permite que ajustes sejam feitos imediatamente se uma máquina começar a operar fora de suas especificações ideais, melhorando o controle sobre o processo produtivo.
- Monitoramento dos turnos para comparar o desempenho dos turnos: A solução proposta ajudará a avaliar o desempenho dos operadores em diferentes turnos. Isso permitirá que a empresa identifique variações na produtividade entre diferentes períodos, possibilitando intervenções direcionadas para equilibrar a eficiência entre os turnos e, se necessário, ajustar as práticas de trabalho ou alocar recursos de forma mais estratégica.

## Coisas

- Maquinário legado de retífica de chanfro: maquinário legado refere-se a equipamentos mais antigos, que ainda têm um papel fundamental no processo de produção, mas que podem não contar com as tecnologias modernas de monitoramento. A retífica de chanfro é um processo de acabamento que cria bordas chanfradas em peças de metal, e é um processo de alta precisão. O *Retrofit* permitirá monitorar o desempenho dessa máquina, mesmo sendo ela um modelo mais antigo, sem a necessidade de substituir completamente o equipamento.
- Movimentação dos operadores: O sistema também será capaz de monitorar como os operadores se movimentam pela fábrica, em particular, o número de operadores atuando na máquina. Esse número será estimado a partir das variações da RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) da rede sem fio usada para transmitir os dados de ciclo da máquina. Os padrões de variação do número de operadores se refletem em dados que podem ser cruzados com o desempenho produtivo e usados para melhorar a eficiência da movimentação, otimizar fluxos de trabalho e aumentar a segurança no local de trabalho.

## Equipe envolvida no projeto.

- Engenheiro eletricista, gerente de projeto: será o principal responsável pela integração dos sistemas eletrônicos e de controle que fazem parte do *Retrofit*. Ele supervisionará as modificações nos sistemas elétricos das máquinas e a implementação de sensores e outros dispositivos de monitoramento.
- Engenheiro de Software: Desenvolverá as aplicações responsáveis por capturar, processar e apresentar os dados coletados pelos sensores. Ele trabalhará em sistemas de visualização e análise que permitirão à equipe de produção tomar decisões baseadas em dados em tempo real.
- Coordenador geral: supervisiona toda a implementação, garantindo que todas as partes do projeto estejam alinhadas com os objetivos e sejam implementadas dentro do prazo e orçamento previstos.

## Resumo da análise

- *Retrofit* não invasivo.
- Emprego de rede de sensores sem fio para transmissão de dados e monitoramento de operadores no setor nos diferentes turnos.

- Monitoramento dos ciclos ON/OFF da máquina através da medida da corrente da máquina.
- Utilizar elemento de borda e armazenamento.
- A rede LAN do cliente não poderá ser usada.

## 5.2 Fase 2: Levantamento dos requisitos

Seguindo a metodologia TpM-PRO, a próxima fase é a de levantamento de requisito, seguindo uma abordagem “top down”.

### Nível 6 - Exibição

Serão estabelecidos métodos para quantificar e exibir dados para o nível gerencial, incluindo ciclos de operações da máquina (RD6) a ser monitorada, tempo de ociosidade, e movimentação de pessoal com quatro e dois operadores em diferentes turnos.

Quanto ao monitoramento dos ciclos da máquina, a exibição deverá consistir em três gráficos: um de operação da máquina em ON/OFF, como níveis lógicos 0 e 1; um segundo gráfico com os valores de corrente do motor associado; e, por fim, um gráfico “pizza” mostrando as porcentagens de tempo de máquina ativa e ociosa. A exibição dos dados será desenvolvida em código aberto e ilustrados no monitor, o qual ficará conectado ao computador de armazenamento como gráficos de porcentagem de funcionamento e tempo.

Neste nível 6 de exibição, o objetivo do KPI de movimentação dos operadores será mostrar para área gerencial informações estimadas sobre o número de operadores durante cada turno. Essa estimativa será baseada na avaliação das variações de RSSI no ambiente.

### Nível 5 - Abstração

No nível 5, o elemento de borda irá processar os valores de RSSI detectados pela RSSF, estimando a quantidade de operadores por turno, através dos diferentes padrões de variação de potência dos sinais de rádio. A possível técnica de abstração será feita por meio de *scripts* de requisição/leitura e exibição, os quais farão a correta interface do elemento de borda com a RSSF. A prova de conceito, irá demonstrar que é possível fazer essa estimativa, embora um programa completo para o cálculo automatizado não tenha sido desenvolvido no escopo deste trabalho. Em uma implementação final, um programa dedicado poderia realizar essa análise de maneira contínua, alimentando o nível de exibição (Nível 6) com o número de operadores sem necessidade de intervenção adicional.



Durante intervalos de duas horas e meia em cada turno, *scripts* de requisição e leitura de dados serão desenvolvidos para leitura dos dados armazenados em arquivos e processamento para representação gráfica no Nível 6.

A mesma técnica de *scripts* de requisição e leitura será utilizada para as medições coletadas das variações de corrente da máquina quando em ciclo e parada. A métrica utilizada foi a detecção os valores de consumo de corrente do motor de arrasto. Os dados serão processados no elemento de borda e exibidos no nível 6 conforme descrição.

## Nível 4 – Armazenamento

Não será empregado qualquer tipo de externo. As informações serão gravadas num computador que será conectado ao nó concentrador. Para isso foi utilizado o RASPBERRY PI 3. Durante a coleta dos dados, serão gerados arquivos com os dados brutos provenientes dos ciclos da máquina e da movimentação dos operadores.

## Nível 3 - Elemento de borda

O elemento de borda será o componente local (nó concentrador) responsável pela coleta dos dados brutos transmitidos durante o período de teste, concentrador nó sensor sem fio RF. A gravação das informações coletadas, será realizada pelo computador RASPBERRY PI que estará conectado ao nó concentrador.

## Nível 2 - Conectividade

A transmissão dos dados de corrente do motor e de RSSI deverá ocorrer por meio de uma rede de sensores sem fio, devido à impossibilidade de instalação de cabos. A mesma rede sem fio será utilizada para transmissão dos valores da corrente do motor e para a medição das variações RSSI, atendendo as duas motivações. A rede sem fio será instalada ao longo do setor, possibilitando que a movimentação dos operadores afete a propagação do sinal de RF. Assim, as variações da intensidade desse sinal refletirá o número de operadores. A ideia, portanto, será em criar caminhos de propagação de modo a cruzarem o setor. Os dados deverão ser transmitidos como pacotes para o nó concentrador e armazenados no elemento de borda.

## Nível 1 - Nó local/sensoriamento

O parâmetro necessário para medição será a corrente do motor de arrasto da máquina RD6, pois é o indicador fidedigno de máquina em ciclo ou parada. Será utilizado um sensor toroidal ou transformador de corrente toroidal (CT) de corrente máxima de 10 Amperes, que irá detectar o campo magnético gerado pela passagem da corrente elétrica na fase do motor AC de arrasto.

As variações do RSSI serão a métrica utilizada para monitorar o número de operadores no ambiente, por meio de uma rede de sensores sem fio, os quais deverão ser espalhados pelo setor estrategicamente, formando uma “gaiola” de propagação. A RSSF será a mesma para as variações RSSI como para as medições de corrente, uma rede de transmissão de pacotes dos dados coletados.

### 5.3 Fase 3: Implementação

Na Fase 3, foi implementada uma Prova de Conceito (PoC - *Proof of Concept*) junto ao cliente e aplicada no setor produtivo. A PoC serviu para validar a funcionalidade de uma potencial solução de IoT para modernização, avaliar sua viabilidade técnica e benefícios, mapear as dificuldades encontradas e quantificar os resultados gerados.

O monitoramento do movimento dos operadores ocorreu durante diferentes turnos: das 7:00 às 17:30 (quando se esperava encontrar quatro operadores), das 17:30 às 21:30 (dois operadores) e das 21:30 às 6:20 (quatro operadores).

A seguir, são apresentados detalhes da implementação dessa PoC.

#### Nível 1 - Nó local

Foi instalado um nó local na máquina a ser monitorada, que inclui um sensor de corrente conectado em uma fase do motor 3 de arrasto e o dispositivo sem fio para a transmissão dos dados. A corrente é medida por um sensor capaz de registrar até 30 A por um circuito medidor de corrente, conforme mostra a Figura 5.5, conectado ao motor de arrasto AC da RD6 e à porta analógica do controlador ATMEGA do dispositivo de rádio. O dispositivo de rádio possui um controlador ATMEGA e um circuito de RF. O

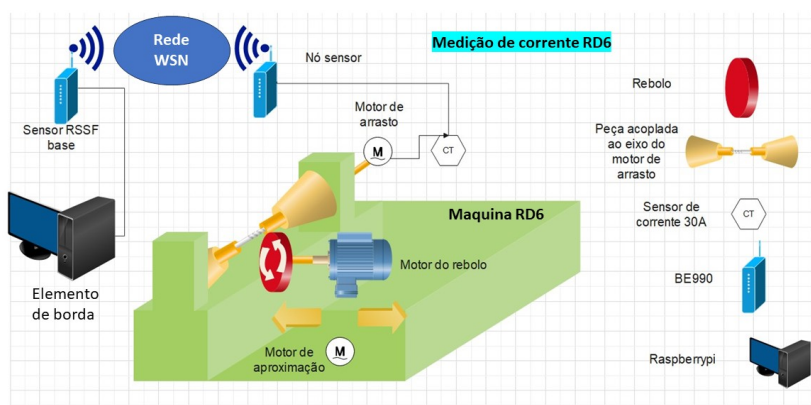


Figura 5.5 – Medição de corrente da máquina RD6 de retificação de chanfro (MACHADO, 2023).

firmware do dispositivo de rádio foi ajustado para transmitir os valores de corrente através da rede sem fio. A Figura 5.5 ilustra o processo de transmissão, do sensor até a base. Esta base recebe e encaminha os dados para o elemento de borda (um computador no setor de engenharia da fábrica), através das conexões USB e um cabo Ethernet RJ45.

A Figura 5.6 mostra o sistema de medição da corrente do motor.

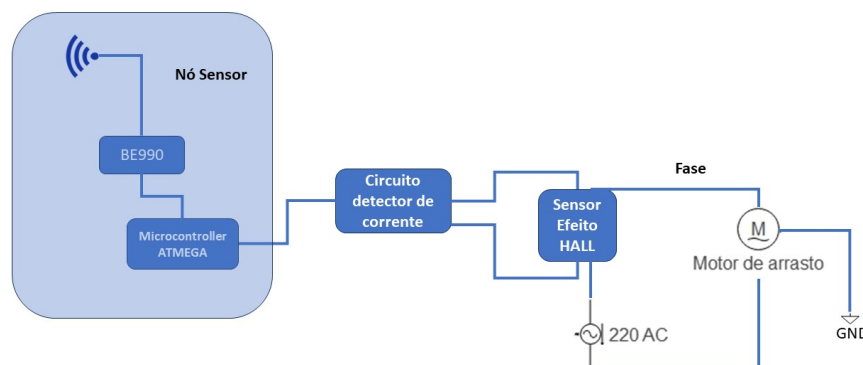


Figura 5.6 – Diagrama em bloco da medição da corrente.

## Nível 2 - Conectividade

A transmissão de dados (valores da corrente do motor e de RSSI) ocorre por meio de uma rede de sensores sem fio. Essa transmissão alcança uma taxa de 250 kbps com 12 pacotes de 52 bytes por minuto. Os dispositivos de rádio foram desenvolvidos no laboratório WISSTEK/Unicamp e operam a 915 MHz, com modulação 2-FSK e canais de 125 kHz de banda. Eles têm um módulo RF com um microcontrolador integrado, transceptor e amplificador RF, atingindo uma potência de transmissão de até 500 mW (27 dBm). Medições de RSSI e corrente foram coletadas durante turnos com quatro e dois operadores, totalizando aproximadamente 2 horas e meia de medição por turno. Os dados, incluindo RSSI e corrente, são enviados para o nó base e processados no computador.

As medições de RSSI são registradas em arquivos de LOG, com valores de potência recebida dos "nós" sensores (em dBm). Rotas configuradas com múltiplos saltos geram variação perceptível de RSSI com base no movimento dos operadores no setor. A Figura 5.7 ilustra a topologia da WSN com a especificação de saltos para cada rota, enquanto a Figura 5.8 mostra a planta baixa do ambiente.

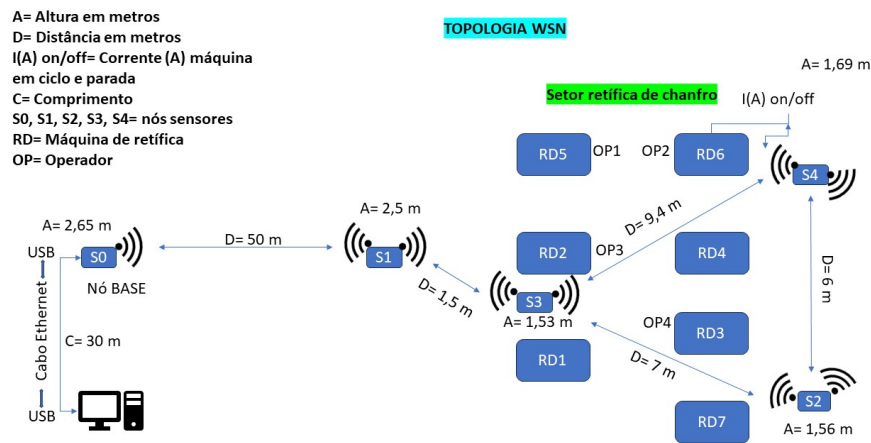


Figura 5.7 – Topologia da rede sem fio.



Figura 5.8 – Planta baixa do ambiente e a rede sem fio instalada (FABRICA, 2015).

## O Protocolo MoT

Para o funcionamento eficiente e seguro da RSSF no envio e recebimento de pacotes e garantir a conectividade dos dispositivos ao legado, foi construída uma pilha de protocolos (BRANQUINHO, 2022) no firmware de código aberto para os dispositivos se comunicarem, alocando no pacote as informações necessárias para o funcionamento da rede.

Além da pilha de protocolos, foi desenvolvido o protocolo MoT que significa *Management over Tunneling* ou Gerenciamento sobre Tunelamento. O MoT baseou-se no modelo de arquitetura TCP/IP e possibilita a configuração das informações de conectividade, encapsulamento de pacotes e roteamento, garantindo a integração da solução IoT ao legado através da RSSF. A eficiência para garantir o monitoramento em tempo real dos dados coletados depende de um protocolo confiável. O uso do MoT garante

o encapsulamento, transporte e decodificação das informações coletadas dos sensores pela RSSF, confiabilidade na comunicação e decodificação correta no elemento de borda.

## Características do protocolo MoT

O protocolo MoT foi desenvolvido para configuração de parâmetros e roteamento. Seu roteamento em saltos é ilustrado na Figura 5.9

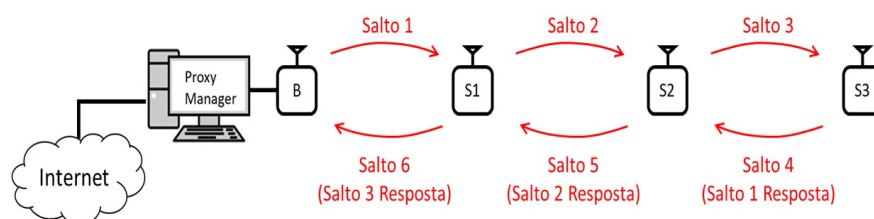


Figura 5.9 – Funcionamento do roteamento do protocolo MoT. (BRANQUINHO, 2022)

A Figura 5.10 ilustra o funcionamento geral da lógica de comunicação do protocolo e a Figura 5.11 descreve sua estrutura.

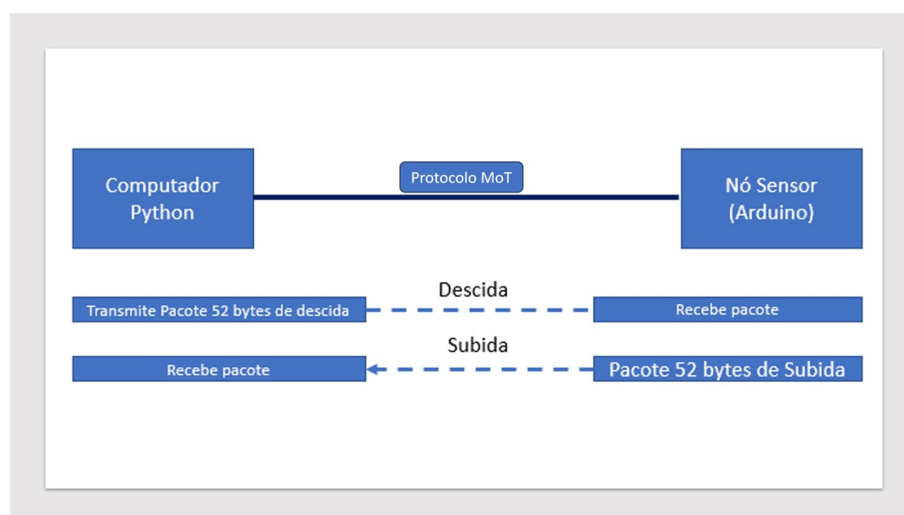


Figura 5.10 – Funcionamento básico do protocolo MoT. (BRANQUINHO, 2022)

O protocolo MoT foi baseado na estrutura TCP/IP e confeccionado um tunelamento das funções principais de comunicação como Aplicação, Transporte, Rede, MAC e Físico, onde se criam os controles na transmissão dos pacotes para cada dessas funções na

pilha de protocolos e pode ser tunelado em qualquer tecnologia. A Figura 5.11 descreve a estrutura do protocolo MoT.

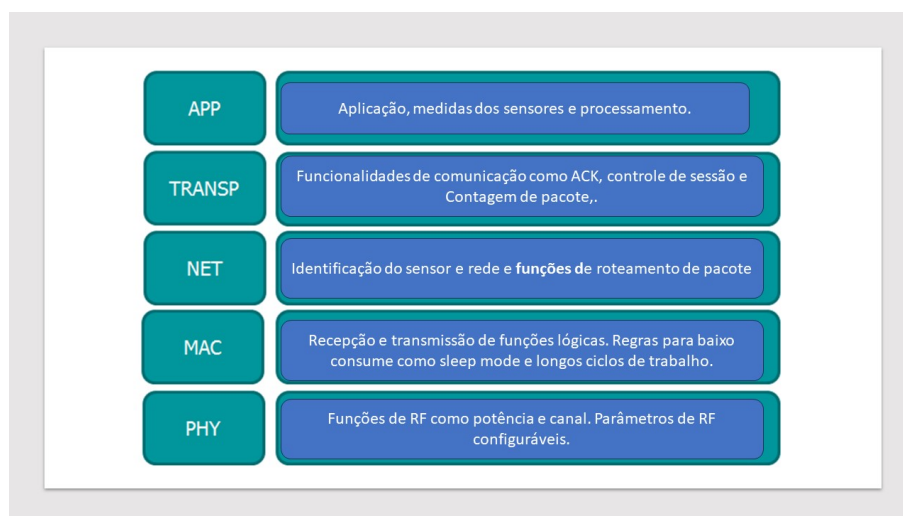


Figura 5.11 – Descrição da estrutura que compõe o protocolo MoT (BRANQUINHO, 2022).

### Nível 3 - Borda

Um computador Raspberry Pi foi instalado e conectado ao nó base para processar e armazenar os dados. Os valores de corrente são coletados, convertidos em pacotes e, posteriormente, processados no elemento de borda. Nesse elemento, limiares foram configurados para diferenciar entre o ciclo de operação da máquina (LIGADA) e o estado de parada (DESLIGADA) com base nos valores de corrente de consumo do motor de arrasto. As medições de corrente permaneceram dentro dos limiares estabelecidos, correspondendo ao ciclo de operação da máquina, com valores variando de 1,0 A à 1,6 A.

### Nível 4 - Armazenamento.

No Raspberry Pi, os dados são armazenados em formatos compatíveis com o formato CSV para posterior conversão no Excel e arquivos de texto.

### Nível 5 - Abstração

Os dados brutos coletados pelo elemento de borda foram processados via *scripts*. Os *scripts* de requisição e exibição foram desenvolvidos em código aberto, sendo basicamente executados interrogando e lendo os dados recebidos dos nós sensores através do nó concentrador, mostrando as medições e armazenando os logs de arquivo.

## Nível 6 - Exibição

Em uma implementação completa do sistema, seriam desenvolvidas interfaces para exibir as porcentagens de tempo em que a máquina esteve nos estados ON e OFF. Adicionalmente, seria criada uma interface para fornecer à gestão informações sobre o número de operadores da máquina em cada turno. No entanto, como o foco deste trabalho foi a prova de conceito, essas interfaces não foram desenvolvidas.

## 5.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os detalhes da aplicação da metodologia TpM-PRO em um projeto de *Retrofit* para uma empresa com problemas de produção. Descreveram-se as ações realizadas em cada fase da TpM-PRO, estruturando os processos, identificando as necessidades e definindo a solução adequada.

No próximo capítulo, serão discutidos os resultados da implementação da prova de conceito.

## 6 Resultados da Prova de Conceito

Neste capítulo, são apresentados os resultados através da PoC para o *Retrofit* de uma máquina legada, visando o monitoramento do estado da máquina e da movimentação dos operadores. O estado da máquina foi monitorado por meio da medição da corrente no motor de arrasto, enquanto a movimentação dos operadores foi detectada através das variações na intensidade do sinal de radiofrequência (RF) no ambiente.

### 6.1 Armazenamento dos dados coletados

Os dados brutos de valores de corrente e RSSI são transmitidos através da rede sem fio até o nó concentrador, e processados no elemento de borda/armazenamento. Após o processamento, os dados são armazenados como:

- Log Medição de corrente: registro dos valores do consumo do motor de arrasto,
- Log Medição da RSSI: registro dos valores de RSSI.

Além dos dados recebidos e armazenados, o elemento de borda/armazenamento contém os executáveis de requisição de leitura e exibição durante a requisição.

A Figura 6.1 mostra um exemplo de arquivos de log de valores de RSSI coletados durante a medição.

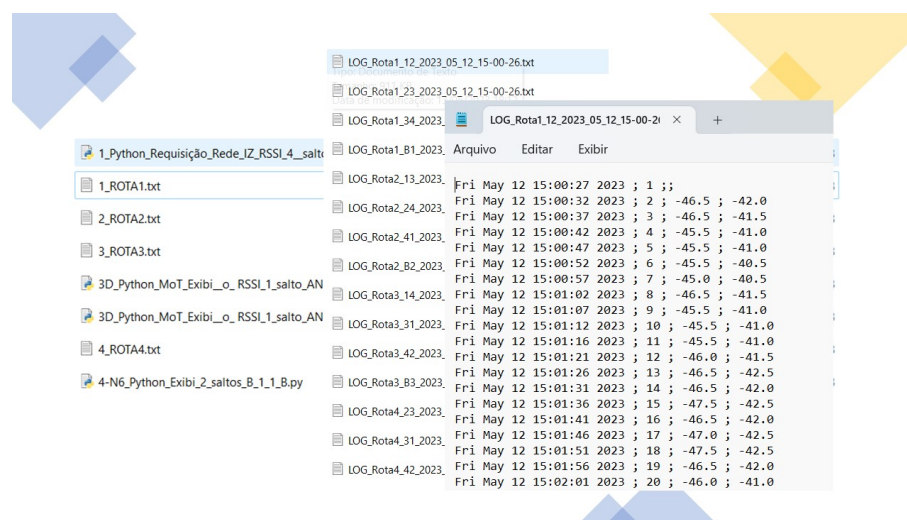


Figura 6.1 – Arquivos de log RSSI.

A Figura 6.2 ilustra os valores de RSSI e corrente.



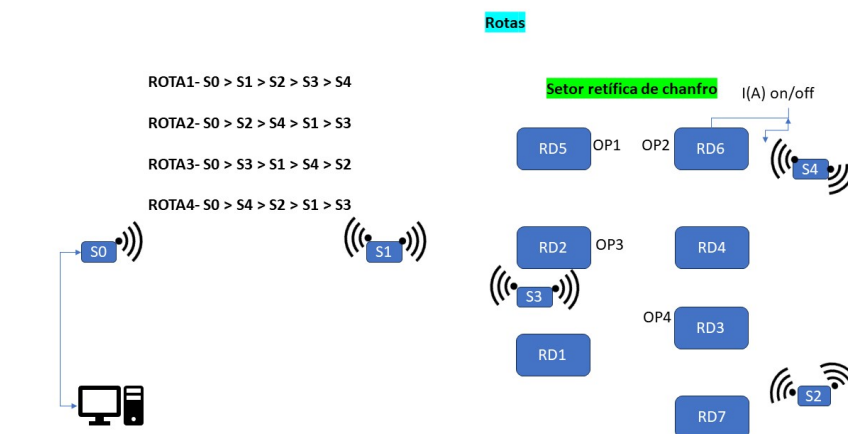
| Arquivo                          | Editar | Exibir |
|----------------------------------|--------|--------|
| LOG_RSSI_B_1_2023_05_12_15-00-21 |        |        |
| medidas_tempo_real.txt           |        |        |
| medidas_corrente.txt             |        |        |

Figura 6.2 – Arquivos de log RSSI e medidas de corrente.

A partir desses arquivos, tem-se a visualização gráfica dos valores para interpretação através do script de exibição.

## 6.2 Resultados sobre a movimentação dos operadores

Para a análise dos resultados de variação do RSSI, focamos exclusivamente nos enlaces instalados que atravessam o setor de produção. Esses enlaces são particularmente suscetíveis a variações no RSSI devido ao movimento dos operadores. Foram implementadas quatro rotas ao longo da área onde a máquina estava localizada. A Figura 6.3 ilustra as rotas implementadas.

Figura 6.3 – Rotas implementadas no *script* de requisição

A partir dos registros de medição, foi possível observar a correlação entre a localização em linha de visada dos enlaces e as variações no RSSI, proporcionando um

cenário mais realista. A Figura 6.4 apresenta os enlaces relevantes para análise, selecionados com base nos registros de resultados, com a exclusão de enlaces considerados irrelevantes.

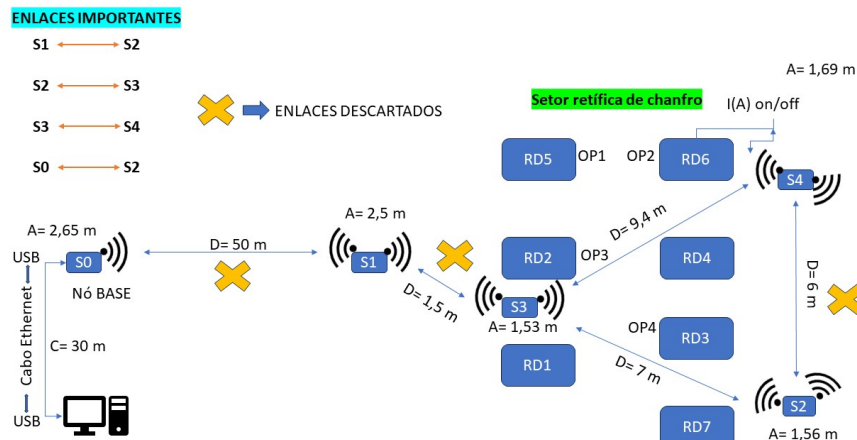


Figura 6.4 – Enlaces importantes na medida de RSSI. (MACHADO, 2023)

Os valores de RSSI são coletados dos arquivos de log das rotas medidas e concentrados numa tabela. A Figura 6.5 mostra a tabela com os enlaces em cada rota. A análise leva em conta os principais enlaces que sofrem variações devido à movimentação de pessoas. No caso, os enlaces em amarelo foram analisados pelas variações de RSSI como comparativo, sendo escolhida a recepção dos enlaces entre os sensores S3-S2 e S3-S4 conforme a Figura 6.4. Estes são os enlaces mais sensíveis a variações devido à sua localização dentro do setor, com visadas diretas cruzando a área dos operadores.

| ROTA 1                   |       |       |       |       |       |       |       |            |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RX0-1                    | RX1-0 | RX1-2 | RX2-1 | RX2-3 | RX3-2 | RX4-1 | RX4-3 | Corrente A | RX0-2 | RX2-0 | RX2-4 | RX4-2 | RX4-4 | RX1-4 | RX3-3 |
| Fri May 12 15:00:27 2023 | 1     |       |       |       |       |       |       |            |       |       |       |       |       |       |       |
|                          |       | -46,5 | -42   | -66,5 | -76   | -50   | -48   | -44        | 1,4   | -31   | -36   | -50,5 | -57   | -35   | -33,5 |
| Fri May 12 15:00:32 2023 | 2     | -46,5 | -41,5 | -67   | -76,5 | -50   | -48   | -44,5      | 1,4   | -32,5 | -37,5 | -51   | -57   | -31,5 | -30   |
| Fri May 12 15:00:37 2023 | 3     | -46,5 | -41,5 | -67   | -76,5 | -51,5 | -49   | -42,5      | 1,45  | -33   | -37,5 | -50   | -57,5 | -29   | -27,5 |
| Fri May 12 15:00:42 2023 | 4     | -45,5 | -41   | -66   | -78,5 | -52   | -49,5 | -43        | 1,42  | -36   | -40,5 | -50   | -56,5 | -31,5 | -28,5 |
| Fri May 12 15:00:47 2023 | 5     | -45,5 | -40,5 | -66   | -76,5 | -50,5 | -49   | -43,5      | 1,43  | -36,5 | -40   | -51,5 | -57   | -29,5 | -28,5 |
| Fri May 12 15:00:52 2023 | 6     | -45   | -40,5 | -65,5 | -75,5 | -50   | -47   | -43,5      | 0,17  | -33   | -37,5 | -50   | -57,5 | -29   | -26,5 |
| Fri May 12 15:01:02 2023 | 7     | -45   | -40,5 | -65,5 | -75,5 | -50   | -47   | -43,5      | 1,46  | -31,5 | -37   | -51   | -57   | -28,5 | -25,5 |
| Fri May 12 15:01:02 2023 | 8     | -46,5 | -41,5 | -66,5 | -75,5 | -49,5 | -48   | -43        |       |       |       |       |       |       |       |
| ROTA 2                   |       |       |       |       |       |       |       |            |       |       |       |       |       |       |       |
| RX0-3                    | RX3-0 | RX3-1 | RX1-3 | RX1-4 | RX4-1 | RX4-2 | RX2-4 | RX0-4      | RX4-0 | RX4-2 | RX2-4 | RX2-3 | RX3-2 | RX3-1 | RX3-3 |
| -35                      | -37   | -35,5 | -57   | -57   | -35,5 | -66,5 | -70   | -42        | -46,5 | -35,5 | -30,5 | -56   | -50   | -45,5 | -48,5 |
| -33                      | -39,5 | -35,5 | -56   | -56   | -35,5 | -65   | -71   | -42        | -46,5 | -36   | -31,5 | -56,5 | -50,5 | -45   | -47,5 |
| -29,5                    | -31,5 | -37,5 | -57,5 | -57,5 | -37,5 | -64   | -69   | -41        | -45,5 | -38   | -33,5 | -57,5 | -50,5 | -45   | -47,5 |
| -28                      | -30   | -37,5 | -57   | -57   | -37,5 | -64   | -68   | -41        | -45,5 | -37,5 | -33,5 | -57   | -49,5 | -44,5 | -47   |
| -29                      | -31,5 | -38,5 | -57   | -57   | -38,5 | -66,5 | -73,5 | -41        | -45,5 | -37,5 | -32   | -57   | -51   | -43,5 | -47   |
| -28,5                    | -30,5 | -37,5 | -58   | -58   | -37,5 | -62   | -69,5 | -41        | -45   | -36,5 | -31,5 | -58   | -50,5 | -44,5 | -47   |
|                          |       |       |       |       |       |       |       | -40        | -45,5 | -38,5 | -33,5 | -57   | -50,5 | -44   | -47   |
| -26                      | -30,5 | -37,5 | -57,5 | -57,5 | -37,5 | -64   | -72,5 | -40,5      | -45,5 | -41   | -36,5 | -57,5 | -50,5 | -44,5 | -47   |
| -29                      | -31,5 | -45,5 | -58,5 | -58,5 | -45,5 | -66,5 | -72   | -40,5      | -45,5 | -45   | -40,5 | -57   | -50,5 | -44,5 | -47,5 |
| -31,5                    | -33,5 | -41,5 | -57   | -57   | -41,5 | -65   | -70,5 | -41        | -46   | -42   | -36,5 | -57   | -50,5 | -46   | -48   |
| -31,5                    | -34   | -40,5 | -56,5 | -56,5 | -40,5 | -65,5 | -70   | -41,5      | -46,5 | -42,5 | -37,5 | -56,5 | -49,5 | -44,5 | -47,5 |
| -27,5                    | -30   | -41   | -58   | -58   | -41   | -61,5 | -69   | -42        | -47,5 | -35   | -31   | -57   | -51   | -45   | -48   |
| -28                      | -30   | -36,5 | -58   | -58   | -36,5 | -65   | -69,5 | -42        | -46   | -37   | -32   | -57,5 | -51,5 | -44   | -47   |
| -27,5                    | -29,5 | -36,5 | -57,5 | -57,5 | -36,5 | -64   | -69   | -42,5      | -47   | -37,5 | -32   | -58   | -50   | -44,5 | -47   |
| -28,5                    | -30,5 | -36,5 | -57   | -57   | -36,5 | -62,5 | -68,5 | -42,5      | -47   | -36   | -31   | -57   | -50   | -44   | -47   |
| -29,5                    | -31,5 | -36,5 | -58   | -58   | -36,5 | -63,5 | -68   | -42,5      | -47   | -37   | -31,5 | -57,5 | -50   | -44   | -47   |
| -29,5                    | -31,5 | -34,5 | -57,5 | -57,5 | -34,5 | -62,5 | -68   | -42,5      | -47,5 | -35,5 | -30,5 | -57   | -50,5 | -44,5 | -47,5 |
|                          |       |       |       |       |       |       |       | -42        | -46,5 | -36   | -31   | -57   | -50   | -44,5 | -47   |

Figura 6.5 – Tabela de enlaces.

A monitoração do movimento dos operadores consistiu em avaliar as variações de RSSI. Grandes variações de RSSI indicam movimentação intensa dos operadores, o que pode ser um indicativo do número de operadores atuando naquele momento.

Tabela 6.1 – Horário dos turnos de operação da máquina.

| Intervalo     | Número de operadores |
|---------------|----------------------|
| 15:00 – 17:30 | quatro operadores    |
| 17:30 – 20:00 | dois operadores      |

As operações com a máquina analisada eram organizadas em turnos, cada um com um número pré-definido de operadores. Para a coleta das amostras de RSSI, foram escolhidos dois intervalos de mesma duração, um com quatro operadores e outro com apenas dois. Os horários dos intervalos estão mostrados na Tabela 6.1.

Foram coletadas amostras de RSSI a cada cinco segundos de 15:00 até 20:00, resultando em 18.000 amostras. A Figura 6.6 mostra os valores de RSSI coletados.

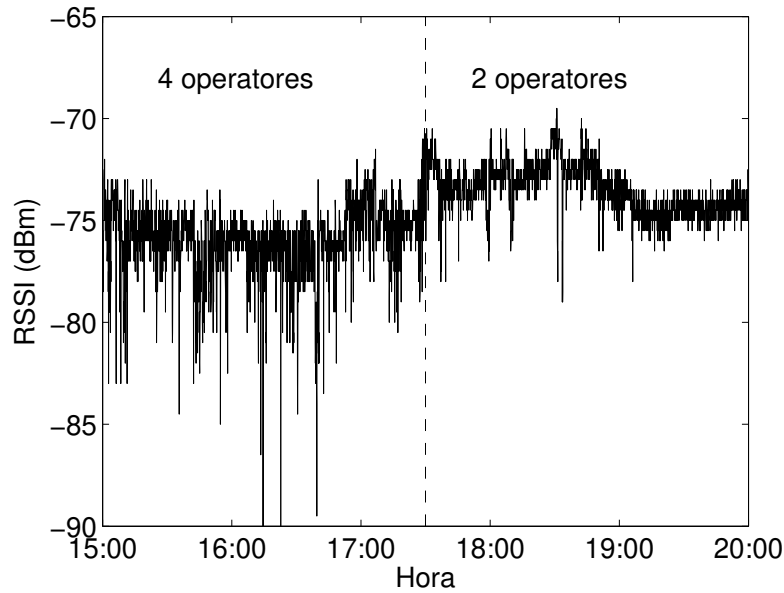


Figura 6.6 – Valores RSSI ao longo do tempo, com quatro e dois operadores (MACHADO, 2023)

Pode-se observar que, durante o intervalo com quatro operadores, os valores de RSSI variam mais do que durante o intervalo com dois operadores. Para quantificar o nível de variação do RSSI, foi usado o desvio padrão das medições de RSSI em janelas deslizantes de comprimento  $L = 100$  amostras, que corresponde a um intervalo de aproximadamente 8,3 minutos<sup>1</sup>. Portanto, o desvio padrão das amostras no  $k$ -ésimo intervalo vale:

$$v(k) = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{i=k}^{i=k-L+1} [T(i) - \mu(k)]^2}, \quad (6.1)$$

em que  $L$  é o comprimento da janela e  $T(i)$  são as amostras de RSSI.

<sup>1</sup> O comprimento da janela foi ajustado empiricamente. Em uma análise mais aprofundada, a duração da janela deve ser ajustada para maximizar a probabilidade de detecção correta.

A quantidade  $\mu(k)$  é a média das RSSI no intervalo, calculada como

$$\mu(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=k}^{i=k-L+1} T(i). \quad (6.2)$$

A Figura 6.7 mostra o desvio padrão com o passar do tempo, nos dois intervalos considerados. Observa-se, portanto, uma correspondência entre o nível de variação do sinal e o número

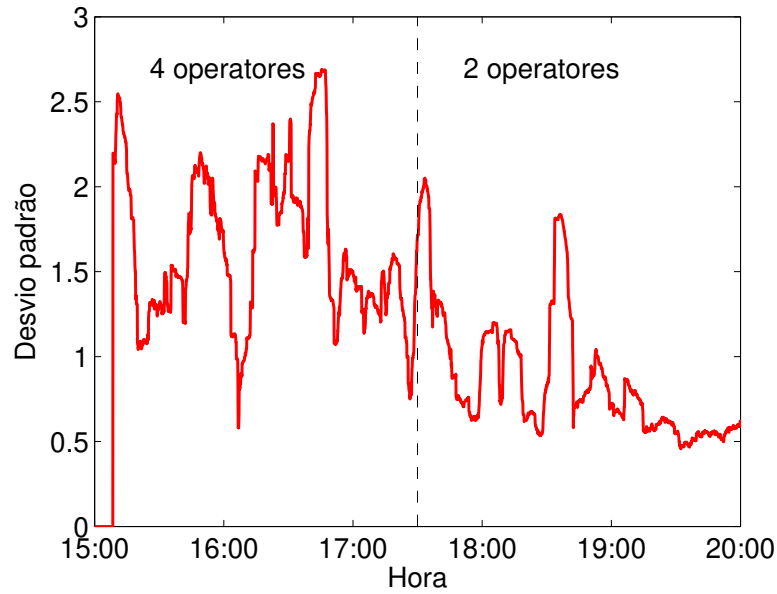


Figura 6.7 – Desvio padrão com quatro e dois operadores (MACHADO, 2023).

de operadores junto à máquina, o que sugere que as variações de RSSI da rede sem fio local podem ser usadas para estimar o número de operadores em atividade.

Esta prova de conceito limitou-se a verificar a viabilidade da proposta de utilizar as variações de RSSI para estimar o número de operadores. Em uma implementação final, serão necessários estudos adicionais para otimizar esse processo de estimação.

### 6.3 Resultados sobre o estado da máquina

Os dados coletados indicam que a máquina estava 27,7% do tempo a máquina estava em ciclo (isto é, acionamento do motor de arrasto) e 72,3% parada, como ilustrado na 6.8. Essa forma de ilustração foi pedida pelo cliente, pois facilitar a visualização dos valores.

A Figura 6.9 ilustra na forma temporal uma realização da sequência de estados da máquina (ciclo e parada da máquina). No eixo da ordenada, o valor 1 corresponde ao estado ligado ou acionado, enquanto o valor 0 corresponde ao estado desligado. Trata-se também de uma ilustração exigida pelo cliente para representar os ciclos da máquina.

De forma análoga à Figura 6.9, o gráfico da Figura 6.10 ilustra o valor da corrente consumida pelo motor de arrasto no lugar dos estados 1 e 0. No eixo da ordenada,

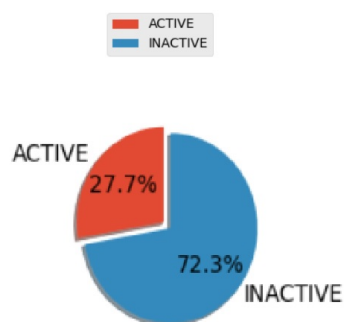


Figura 6.8 – Porcentagem dos estados da máquina (MACHADO, 2023).

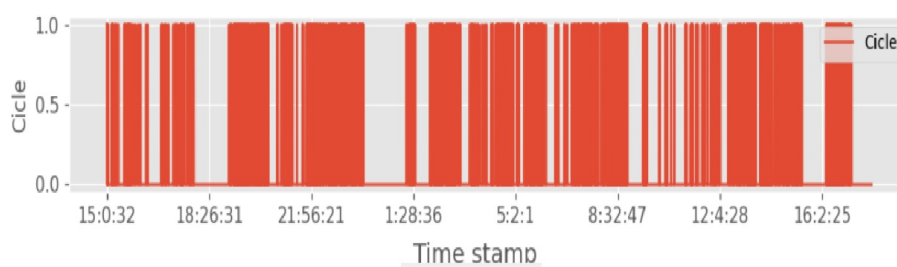


Figura 6.9 – Comportamento temporal do estado da máquina (MACHADO, 2023).

tem-se o valor da corrente de operação em cada acionamento (1,5 A) em função do tempo no eixo da abscissa. Cada acionamento ilustrado na Figura 6.10, como na Figura 6.9, é o número de vezes que o operador liga o motor de arrasto para realizar a retífica da peça. O intervalo de tempo na troca da peça é curto e dura alguns segundos, não sendo significativo na soma do tempo ocioso no total. O que se analisa aqui é o resultado das proporções ocasiões de máquina em ciclo e parada ou ativa e inativa, pois os tempos inerentes à troca da peça tendem a ser maiores e são os indicadores-chave do montante.

Esses gráficos permitirão à cadeia gerencial ter conhecimento sobre a operação da máquina, como, por exemplo, o grau de utilização da máquina.

Como comentado na seção anterior, em uma implementação final, os dados da corrente de arrasto podem ser processados para gerar informações mais aprofundadas sobre

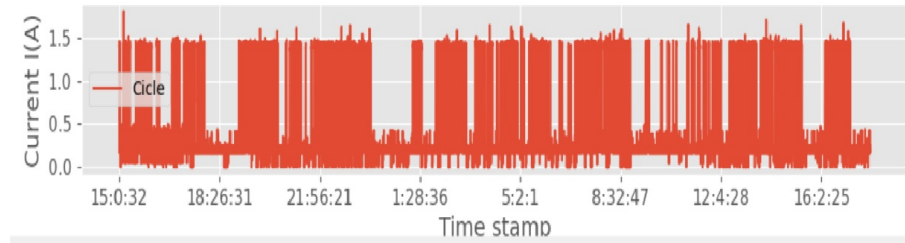


Figura 6.10 – Medição de corrente do motor de arrasto ([MACHADO, 2023](#))

o funcionamento da máquina. Essas etapas de pós-processamento não foram exploradas nesse trabalho, pois o foco foi na prova de conceito envolvendo o uso da TpM em *Retrofit*.

## 6.4 Conclusão

Esse capítulo apresentou os resultados de uma prova de conceito para o *Retrofit* de uma máquina legada, demonstrando a viabilidade de monitoramento não invasivo de operações industriais envolvendo máquinas e operadores. Os dados confirmaram que tanto o estado da máquina quanto a movimentação dos operadores podem ser monitorados com eficácia, por meio de medições de corrente no motor da máquina e variações no sinal de RF.

A prova de conceito mostrou que a metodologia TpM-PRO pode ser usada para o desenvolvimento de *Retrofit*, essencial para plantas industriais com máquinas legadas. Para uma implementação completa, seriam úteis interfaces de visualização que ofereçam uma análise detalhada dos estados de operação e estimativa do número de operadores, aprimorando a gestão da produção.

## 7 Conclusão

O conceito de *Retrofit* invasivo ou não invasivo é viável em plantas industriais legadas, reduz custos com soluções tecnicamente eficientes e sem grandes impactos no legado, preservando o potencial industrial e inserindo-o na indústria 4.0. Este trabalho mostrou a importância do *Retrofit* e o seu desenvolvimento através da TpM-PRO, pois, sem uma metodologia consolidada, é grande o risco do projeto não dar certo ou passar por muitos retrabalhos no melhor dos casos.

### Principais Contribuições deste trabalho:

- A eficácia na aplicação da TpM-PRO para *Retrofit* em sistemas industriais legados garante uma solução IoT que segue o fluxo de responsabilidades na divisão entre as áreas de empreendimento e fábrica, proposta por *Groover*. O objetivo dessa metodologia é sempre começar o projeto pelo nível de empreendimento, na tomada de decisões estratégicas, definição da solução e viabilidade, para posterior aplicação em fábrica. Essa divisão, com a TpM-PRO, permite que a solução IoT de *Retrofit* ou somente IoT, seja implementada de modo escalável, se adaptando com as mudanças industriais ao longo do tempo, minimizando riscos, impactos futuros, aperfeiçoamento da solução e integração harmoniosa das áreas. O conceito também atribui operações específicas de controle e monitoramento ao nível de fábrica, incluindo processos industriais.
- Foi demonstrada a aplicação da metodologia TpM-PRO no *Retrofit* de maquinário legado. Foram detalhadas as etapas da Fase 1, que abrangeu o estudo inicial de *Retrofit*; da Fase 2, responsável pela coleta dos requisitos para o desenvolvimento da solução; e da Fase 3, na qual foi implementada a prova de conceito. A abordagem, que iniciou com a análise na área gerencial e seguiu para a área fabril, promoveu a sinergia essencial para a consolidação da solução.
- Foi implementada de uma prova de conceito que demonstrou a viabilidade de um *Retrofit* não invasivo em maquinário legado em uma aplicação real no setor metal-mecânico. A prova de conceito incluiu a integração de sensoramento e conectividade por meio de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), utilizando um protocolo de comunicação confiável e softwares de código aberto, sem necessidade de modificações físicas ou elétricas no maquinário, nos processos, no software existente ou no ambiente.

## Trabalhos Futuros

O conceito de *Retrofit* aqui apresentado e aplicado através da TpM-PRO serve de base para projetos futuros, com o aprimoramento dessa metodologia, adaptando-a para diversos tipos de cenários na indústria. Desta forma, conforme este trabalho de *Retrofit* e possíveis outros, a estratégia empregada de unir uma metodologia consolidada de soluções IoT adaptada para *Retrofit* de maquinário legado, com a divisão da indústria nos níveis empreendimento e fabril, surge como uma solução IoT diferenciada, eficiente e abrangente.

Esse modelo pode ser aplicado em qualquer tipo de produção, independentemente do ramo industrial, sendo escalável para ambientes complexos, com desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas de integração, protocolos de conectividade e validação desde grandes plantas industriais até PMEs. A aplicação de *Retrofit* através da TpM-PRO não somente tem aplicabilidade em plantas legadas, mas também em melhoria de processos já definidos no contexto IIoT.



## Referências

- BRANQUINHO, P. D. R. A. M. P. D. O. C. *DISCIPLINA IN505 – INTRODUÇÃO ÀS REDES DE DADOS SEM FIO*. 2022. Presencial / online. Curso de extensão oferecido por Unicamp. Disponível em: <<https://iot.ic.unicamp.br/#class>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 53, 54 e 55.
- FABRICA, C. *Distribuição dos sensores na Planta Baixa da retífica de chanfro mais engenharia e pavilhões*. 2015. PDF. Planta Baixa). Citado 2 vezes nas páginas 10 e 53.
- FERREIRA, L. C. B. et al. The three-phase methodology for iot project development. *Internet of Things*, v. 20, p. 100624, 2022. ISSN 2542-6605. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660522001056>>. Citado 6 vezes nas páginas 10, 16, 25, 27, 28 e 29.
- FERREIRA, L. C. B. C. et al. A pbl-based methodology for iot teaching. *IEEE Communications Magazine*, v. 57, n. 11, p. 20–26, 2019. Citado na página 16.
- FORCELLINI, S. M. W. . D. R. S. R. . R. O. de S. . M. A. M. V. . F. A. Retrofitting, um caminho lean para a indústria 4.0. *XXXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, ENEGEP, p. 1–15, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- GREEN, C. o. C. D. J.; GROUP, A. B. “iot reference model”. *IoT World Forum*, October 2014, Chicago USA, IoT World Forum, October 2014, Chicago USA, <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/0f1d1327c5195d1922175dd77878b9fb.pdf>, p. 1–12, 2014. Citado na página 27.
- GROOVER, M. *Automação Industrial e Sistemas de Manufatura*. [S.l.]: Pearson, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 10, 31 e 32.
- Keshav Kolla, S. S. V. et al. Retrofitting of legacy machines in the context of industrial internet of things (iiot). *Procedia Computer Science*, v. 200, p. 62–70, 2022. ISSN 1877-0509. 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922002149>>. Citado na página 22.
- 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. ISSN 2213-8463. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X>>. Citado na página 24.
- LIMA, F.; MASSOTE, A. A.; MAIA, R. F. Iot energy retrofit and the connection of legacy machines inside the industry 4.0 concept. In: *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, p. 5499–5504. Citado na página 21.
- MACHADO, P. C. . R. Y. . R. M. A. . O. C. B. . A. T. Application of three-phase methodology for retrofit 4.0 in legacy industrial plants. *IARIA Congress Valencia Spain*, 2023. Citado 7 vezes nas páginas 10, 51, 59, 60, 61, 62 e 63.

MORAES, S. et al. Construção de bases de conhecimentos digitais do processo de moagem de minério com a integração da fenomenologia e sistemas ciberfísicos. In: . [S.l.: s.n.], 2022. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.

SANTOS, M. M. D.; LEME, M. O.; JUNIOR, S. L. S. *Indústria 4.0*. [S.l.]: Érica, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 15.