



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

ROTAÇÃO DA CORREIA EM TRANSPORTADORES TUBULARES: DESENVOLVIMENTO  
DE UM ÍNDICE DE ESTABILIDADE E DIGITALIZAÇÃO DO MONITORAMENTO DA  
POSIÇÃO DE SOBREPOSIÇÃO

Leonardo dos Santos e Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Emanuel Negrão Macêdo

Coorientador: Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho

Belém


Fevereiro 2026

# “ROTAÇÃO DA CORREIA EM TRANSPORTADORES TUBULARES: DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE ESTABILIDADE E DIGITALIZAÇÃO DO MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE SOBREPOSIÇÃO”


**Leonardo dos Santos e Santos**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA/ITEC/UFPA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.


Aprovada por:

Documento assinado digitalmente  
 **EMANUEL NEGRAO MACEDO**  
Data: 23/02/2026 18:46:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


*Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo (Presidente)*

Documento assinado digitalmente  
 **PAULO ROBERTO CAMPOS FLEXA RIBEIRO FILH**  
Data: 23/02/2026 19:12:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


*Prof. Dr. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho (Coorientador)*

Documento assinado digitalmente  
 **CLAUDIO JOSE CAVALCANTE BLANCO**  
Data: 24/02/2026 11:27:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


*Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco (Membro)*

Documento assinado digitalmente  
 **JOSE ANTONIO DA SILVA SOUZA**  
Data: 24/02/2026 15:48:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

*Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza (Membro)*

Documento assinado digitalmente  
 **DENILSON DA SILVA COSTA**  
Data: 25/02/2026 06:38:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

*Prof. Dr. Denilson da Silva Costa (Membro Externo)*

Documento assinado digitalmente  
 **GLAUBER CRUZ**  
Data: 25/02/2026 10:23:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

*Prof. Dr. Glauber Cruz (Membro Externo)*

Belém, PA - Brasil  
Fevereiro de 2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo FICAT, mediante os dados fornecidos pelo autor

---

B452m Santos, Leonardo dos Santos e.

ROTAÇÃO DA CORREIA EM TRANSPORTADORES TUBULARES: DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE ESTABILIDADE E DIGITALIZAÇÃO DO MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE SOBREPOSIÇÃO / Leonardo dos Santos e Santos. — Belém: UFPA/PRODERNA, 2026.

xxix, 225f.: il. color.; 29,7 cm.

Orientador(a): Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo

Coorientador(a): Prof. Dr. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2026.

Referências Bibliográficas: p. 188-218.

1. Transportadores tubulares. 2. Rotação da correia. 3. Digitalização. 4. Protótipo físico. 5. Internet Industrial das Coisas. I. Macêdo, Emanuel Negrão. II. Universidade Federal do Pará, ITEC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. III. Título.

CDD 620.11

---

*Dedicado aos meus pais, irmã, esposa e filha.*

*Em honra ao milagre operado por Deus na cura  
de minha mãe.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus. “Porque todo o que é nascido de Deus vence o mundo; e esta é a vitória que vence o mundo, a nossa Fé” (1 João 5:4).

À Nossa Senhora de Nazaré. “Há um nome em que cabe todo o Universo: Maria” (frase dita por minha mãe).

Aos meus pais, irmã, esposa e filha.

Aos meus orientadores e amigos de longa data, Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo (UFPA) e Prof. Dr. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho (UEMA).

Aos coautores das produções científicas realizadas durante esse projeto de pesquisa, Prof. Dr. Adilto Cunha (UEMA) e Prof. Dr. Noé Cheung (UNICAMP).

Ao cotitular do modelo de utilidade vinculado a esse projeto de pesquisa, Eng. Rodrigo Pereira Neto.

Às instituições de ensino superior Universidade Federal do Pará (UFPA) e Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), pertencente ao Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA).

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) e ao discente em iniciação científica nesse projeto de pesquisa, Júlio César Klein (UEMA).

Ao Laboratório de Lubrificação (LabLub), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Ao Laboratório *Innovation Fabrication Lab* (IFL), pertencente ao Laboratório Central *Prototyping and Product Development Core Lab* (PCL) da Instituição *King Abdullah University of Science and Technology* (KAUST).

*“Papai, você foi incrível [...]”*

(Luna, minha filha, aos 3 anos e meio de idade)

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ROTAÇÃO DA CORREIA EM TRANSPORTADORES TUBULARES: DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE ESTABILIDADE E DIGITALIZAÇÃO DO MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE SOBREPOSIÇÃO

Leonardo dos Santos e Santos

Fevereiro/2026

Orientador: Emanuel Negrão Macêdo

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Transportadores tubulares oferecem uma alternativa ambientalmente favorável ao manuseio de granéis sólidos em transportadores de correia aberta, especialmente em rotas de longa distância ou complexas. Entretanto, a sustentabilidade desta tecnologia é comprometida pela instabilidade operacional. Rotas complexas, variações operacionais e fatores ambientais resultam em forças de contato desiguais, o que desencadeia a rotação da correia. Este é um modo de falha crítico que requer monitoramento contínuo ao longo do ciclo de vida do transportador. A escassez de dados de falha é um desafio comum nesta aplicação. Neste estudo, analisou-se o modo de falha da rotação de uma correia tubular e propôs-se um índice de estabilidade de sobreposição para avaliar a resiliência da correia por meio de um

estudo de caso em um transportador tubular de curta distância. Utilizando uma rede sem fio de Internet Industrial das Coisas, desenvolveu-se um sistema de medição independente da correia, com capacidade multiparâmetro. Formularam-se hipóteses sobre os princípios tecnológicos que constituem os requisitos mínimos para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da rotação da correia. Adotaram-se tecnologias habilitadoras para fomentar a inovação e implementou-se um protótipo físico para mitigar a escassez de dados. Os resultados de medição demonstraram precisão adequada para fins de digitalização: ângulo de sobreposição ( $3,31 \pm 16,76^\circ$ ), diâmetro da formação tubular ( $+13,39 \pm 7,21$  mm) e comprimento de sobreposição ( $-26,28 \pm 25,15$  mm), com base em 307 amostras com uma latência de 350,13 ms. O modelo demonstrou potencial para aplicação industrial com desempenho aceitável para monitoramento em tempo real.

Palavras-chave: transportadores tubulares, rotação da correia, digitalização, protótipo físico, Internet Industrial das Coisas

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

BELT ROTATION IN PIPE CONVEYORS: DEVELOPMENT OF A STABILITY INDEX AND  
DIGITALIZATION OF OVERLAP MONITORING

Leonardo dos Santos e Santos

Fevereiro/2026

Advisor: Emanuel Negrão Macêdo

Research Area: Process Engineering

Pipe conveyors provide an environmentally friendly alternative to open-troughed bulk solids conveyance, particularly for long or complex routing applications. However, the sustainability of this technology is compromised by unstable operations. Complex routing, operational variations, and environmental factors create uneven contact forces, triggering belt rotation. This is a critical failure mode that requires continuous monitoring throughout the conveyor's lifecycle. Insufficient failure data represents a typical challenge for this application. In this study, the belt rotation failure mode was analyzed, and a linearized model of an overlap stability index was proposed to evaluate the resilience of the overlap position through a case study of a short-flight pipe conveyor. Using an Industrial Internet of Things network, a belt-independent measurement system with multiparameter capability was developed. Technological principles were hypothesized as the minimum requirements for enabling the

scaling of belt-rotation monitoring in industrial applications. Enabling technologies were adopted to foster innovation, and a physical prototype was implemented to address data scarcity. The measurement results demonstrated suitable precision for digitization objectives: overlap angle ( $3.31 \pm 16.76^\circ$ ), pipe diameter ( $+13.39 \pm 7.21$  mm), and overlap length ( $-26.28 \pm 25.15$  mm), based on 307 samples with a latency of 350.13 ms. The framework demonstrates potential for industrial deployment with acceptable performance for real-time monitoring.

Keywords: pipe conveyors, belt rotation, digitization, physical prototype, Industrial Internet of Things

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	3
1.1.1. Desafio da estabilidade em transportadores tubulares .....	3
1.1.2. Desafio no monitoramento da rotação da correia.....	6
1.1.3. Desafio para a digitalização industrial em larga escala .....	9
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo Geral .....	12
1.2.2. Objetivos Específicos .....	12
1.3. HIPÓTESES .....	12
1.4. CONTRIBUIÇÕES .....	13
1.5. METODOLOGIA .....	13
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
CAPÍTULO 2 .....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA E MÉTODOS ANALÍTICOS .....	16
2.1. TÍTULO DA PUBLICAÇÃO.....	16
2.2. RESUMO DO CAPÍTULO .....	16
2.3. INTRODUÇÃO .....	17
2.4. ANÁLISE DO MODO DE FALHA .....	18
2.4.1. Causas e fatores contribuintes .....	22
2.4.1.1. Ventos fortes.....	23
2.4.1.2. Chuvas intensas.....	23
2.4.1.3. Temperaturas abaixo de zero.....	24
2.4.1.4. Luz solar, ozônio, oxigênio e calor .....	24
2.4.1.5. Parada prolongada do transportador .....	26
2.4.1.6. Pó ou granel sólido de difícil fluidez .....	27

2.4.1.7. Materiais desaguados .....	29
2.4.1.8. Degradação pelo material manuseado .....	30
2.4.1.9. Instabilidade no enchimento .....	31
2.4.1.10. Rota do transportador inadequada .....	33
2.4.1.11. Velocidade de operação elevada .....	35
2.4.1.12. Flecha da correia entre painéis .....	37
2.4.1.13. Elevado número de ciclos de abertura e fechamento .....	38
2.4.1.14. Reforço da correia inadequado .....	39
2.4.1.15. Baixa razão entre a largura da correia e o diâmetro da formação tubular .....	40
2.4.1.16. Baixa rigidez transversal .....	42
2.4.1.17. Desalinhamento dos painéis em relação à linha central do transportador .....	43
2.4.1.18. Variação de dureza ao longo do comprimento da correia .....	44
2.4.1.19. Problemas durante a vulcanização de emendas .....	45
2.4.1.20. Tensão longitudinal excessiva durante a instalação .....	47
2.4.1.21. Tensão de esticamento incorreta .....	49
2.4.1.22. Desalinhamento dos rolos .....	51
2.4.1.23. Baixa tensão nos rolos de moldagem .....	53
2.4.1.24. Falta ou travamento de rolos do transportador .....	55
2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS .....	57
2.5.1. Torque de retenção rotacional .....	57
2.5.2. Índice de estabilidade de sobreposição .....	68
2.5.3. Método experimental .....	71
2.6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	75

2.7.	CONCLUSÕES .....	88
CAPÍTULO 3 .....		90
3.	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....	90
3.1.	TÍTULO DA PUBLICAÇÃO .....	90
3.2.	RESUMO DO CAPÍTULO .....	90
3.3.	INTRODUÇÃO .....	91
3.4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	93
3.4.1.	Aquisição de dados .....	95
3.4.2.	Transmissão sem fio .....	98
3.4.3.	Processamento e armazenamento de dados .....	102
3.4.4.	Treinamento do modelo .....	103
3.4.5.	Computação em nuvem .....	106
3.4.6.	Interface homem-máquina .....	106
3.5.	TEORIA E CÁLCULOS .....	110
3.5.1.	Medição óptica ativa de distância .....	110
3.5.2.	Detecção de movimento de 3 eixos .....	111
3.5.3.	Comunicação sem fio não orientada à conexão .....	112
3.5.4.	Ajuste fino de modelos de linguagem autorregressivos .....	114
3.6.	RESULTADOS .....	117
3.7.	DISCUSSÃO .....	124
3.8.	CONCLUSÕES .....	127
3.9.	TRABALHOS FUTUROS .....	128
3.10.	FINANCIAMENTO .....	130
CAPÍTULO 4 .....		131
4.	MODELO DE DIGITALIZAÇÃO .....	131
4.1.	TÍTULO DA PUBLICAÇÃO .....	131
4.2.	RESUMO DO CAPÍTULO .....	131

4.3.	INTRODUÇÃO .....	132
4.4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	133
4.4.1.	Contexto da Transformação Digital .....	134
4.4.2.	Lacuna de Pesquisa e Hipótese.....	137
4.4.3.	Implementação dos Princípios Tecnológicos.....	144
4.4.3.1.	Princípio 1: Protótipo Físico para Treinamento.....	146
4.4.3.2.	Princípio 2: Técnicas de Medição Independentes da Correia.....	149
4.4.3.3.	Princípio 3: Processamento Multiparâmetro .....	150
4.4.3.4.	Princípio 4: Monitoramento das rotações absolutas da correia.....	152
4.4.3.5.	Princípio 5: Detecção Oportuna de Estados Inseguros .....	154
4.4.3.6.	Princípio 6: Múltiplos pontos de medição ao longo da rota.....	157
4.4.4.	Implementação de Tecnologias Habilitadoras .....	159
4.4.4.1.	Tecnologia Habilitadora 1: Redes IIoT .....	159
4.4.4.2.	Tecnologia Habilitadora 2: Computação assistida por modelos de linguagem 163	
4.4.4.3.	Tecnologia Habilitadora 3: Interface Homem-Máquina.....	166
4.5.	RESULTADOS.....	168
4.6.	DISCUSSÃO.....	177
4.7.	CONCLUSÕES.....	181
4.8.	TRABALHOS FUTUROS .....	183
	CAPÍTULO 5.....	185
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	185
	REFERÊNCIAS.....	188
	APÊNDICE A – Glossário de tradução de termos técnicos .....	219
	APÊNDICE B – Correções nos textos agregados.....	223

APÊNDICE C – Checklist para inspeção de segmentos curvos .....	225
--	-----

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. (a) Posição de sobreposição das bordas em uma correia tubular; (b) referência na numeração dos rolos; (c) referência em graus; (d) referência em horas [5].....19
- Figura 2. Exemplos de rotação em correias tubulares: (a) correia têxtil com sobreposição a 90°; (b) correia com reforço em aramida, com sobreposição a 60°; (c) correia com reforços em cabos de aço com sobreposição a 60° [5]. .....19
- Figura 3. Desalinhamento e torção de uma correia tubular têxtil em um tambor de descarga, 6 segundos após o início de uma condição anormal: (a) condição inicial; (b) dobra da correia; (c) colapso da formação tubular; (d) torção da correia; (e) inversão de posição das coberturas da correia no transportador [5]. .....20
- Figura 4. Efeitos secundários da rotação da correia em transportadores tubulares: (a) derramamento de material a granel; (b) danos nas bordas da correia; (c) incêndio no transportador de correia; (d) desgaste na borda interna da correia; (e) entrada de águas pluviais; (f) propagação de fissuras na correia [5].....21
- Figura 5. Propagação de trincas em correias transportadoras tubulares. (a, b) Película fina oxidada na superfície da cobertura de retorno; (c, d) Crescimento e nucleação de fissuras [5]. .....26
- Figura 6. (a) Fluidez de sólidos em transportadores tubulares em função do teor de umidade: região a – pontes líquidas, região b – pontes líquidas e material saturado e região c – material saturado; detalhes da seção transversal de uma correia transportadora tubular com: (b) pontes líquidas; (c) pontes líquidas e material saturado; (d) material saturado [5]. .....28
- Figura 7. Forças de contato desiguais decorrentes da saturação do material. (a) material saturado na região de sobreposição das bordas da correia; (b) enchimento excessivo da correia por material saturado; (c) material saturado na região de carregamento da correia tubular [5]. .....29
- Figura 8. Enchimento excessivo em correias transportadoras tubulares. (a) Compressão do granel sólido no segmento de carga; (b) cisalhamento dos parafusos de sustentação do rolo

na posição superior de um painel; (c) sobrecarga da correia na região de carregamento [5]. .....	32
Figura 9. Exemplos de reforços utilizados em correias tubulares: (a) aramida; (b) lonas têxteis; (c) cabos de aço [5].	40
Figura 10. Relação B/D em diferentes comprimentos de sobreposição para diâmetro nominal de 375 mm. (a) relação B/D igual a 3,6; (b) relação B/D igual a 3,8; (c) relação B/D igual a 4,0; (d) relação B/D igual a 4,2 [5].	41
Figura 11. Emenda em dedo aplicada a uma correia tubular: (a) remoção da cobertura; (b) corte e preparo das tiras em dedos; (c) encaixe das tiras em dedos; (d) esquadreamento e alinhamento da emenda; (e) aplicação de solvente; (f) montagem da zona de transição da emenda; (g) aplicação de cola cimento; (h) montagem da borracha de cobertura inferior; (i) aplicação de borracha de ligação; (j) montagem da borracha de cobertura superior; (k) conformação das bordas da correia; (l) monitoramento de pressão e temperatura de vulcanização [5].	46
Figura 12. Tração de uma correia tubular durante a instalação: (a) dispositivo em forma de torpedo para instalação; (b) remoção de uma correia avariada após rompimento [5].	48
Figura 13. Instalação de uma correia tubular: (a) posicionamento da correia; (b) enrolador de correia; (c) correia posicionada em dobras sobrepostas após sequência de emendas; (d) bobina com a correia a ser instalada; (e) tração da correia utilizando cabo de aço conectado a uma pá carregadeira [5].	49
Figura 14. Problemas de alinhamento da correia no segmento de retorno em transportadores tubulares: (a) desalinhamento da correia plana; (b) colapso da correia no tambor de retorno; (c) dobra das bordas da correia na zona de transição [5].	52
Figura 15. Alternância das bordas de sobreposição em uma correia tubular: (a) durante o processo de substituição; (b) após a perda de ajuste nos rolos de moldagem na zona de transição; (c) no segmento de retorno após a ocorrência de rotação severa da correia [5].	54

Figura 16. Voos de inspeção automatizados em um transportador tubular utilizando a tecnologia <i>Deep Track</i> da empresa brasileira Pix Force: (a) VANT na plataforma de lançamento; (b) voo de inspeção em curso; (c) detecção de rolos e medição de temperatura com câmeras infravermelhas e RGB [5].	56
Figura 17. Segmento reto equivalente a uma seção curva em um transportador tubular [5].	58
Figura 18. Variáveis para o cálculo do torque de retenção de uma correia transportadora tubular: (a) representação da superfície de contato viscoelástico entre a correia e os rolos; (b) vista lateral da deformação viscoelástica [5].	60
Figura 19. Variáveis para cálculo das forças de contato em uma correia transportadora tubular usando o modelo linear proposto [5].	68
Figura 20. Modelo de interferência e funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal: (a) visão gráfica do índice <i>OSI</i> ; (b) condições instáveis devido à redução da rigidez transversal; (c) condições estáveis; (d) condições instáveis devido ao aumento da força de abertura [5].	71
Figura 21. Rota do transportador tubular selecionado com segmentos agrupados [5].	76
Figura 22. Vazão mássica e grau de enchimento harmonizado com base em dados reais de operação do transportador tubular selecionado [5].	78
Figura 23. Gráficos de radar do torque de retenção e do momento rotacional da correia para os segmentos curvos: (a) 2–9; (b) 10; (c) 11–12; (d) 13; (e) 15–16; (f) 17 [5].	81
Figura 24. Gráficos das funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal para os segmentos curvos: (a) 2–9; (b) 10; (c) 11–12; (d) 13; (e) 15–16; (f) 17 [5].	82
Figura 25. Vista superior dos pontos de interesse para inspeção de campo no transportador tubular [5].	83
Figura 26. (a) Torque de retenção nos segmentos curvos 10, 13, 15, 16 e 17 com perda de contato nas posições 3 e 4 dos rolos; (b) distância entre a correia e os rolos dos segmentos curvos 10, 13, 15, 16 e 17 considerando a vida útil remanescente da correia, com perda de contato nas posições 3, 4 e 5 dos rolos [5].	85

Figura 27. Múltiplas rotações da correia tubular em curta distância: (a) zona de transição na estação de descarga; (b) torção na estação de esticamento; (c) alternância das bordas de sobreposição; e (d) diâmetro reduzido da formação tubular [36].	92
Figura 28. Vista superior do transportador tubular de referência e perfil de elevação do terreno [36].	94
Figura 29. Projeto conceitual da unidade de medição: (a) vista real do transportador tubular de referência; (b) modelo 3D de um segmento do transportador; (c) modelo 3D da seção da correia; (d) modelo 3D da unidade de medição; peças modulares para prototipagem: (e), (i) seção individual do módulo circular; (f), (j) invólucro para sensor infravermelho de distância; (g), (h), (k) suporte de montagem da unidade de medição; e (l) processo de impressão 3D [36].	96
Figura 30. Bancada de testes e seus principais componentes [36].	98
Figura 31. Configuração de rede controlador-respondente [36].	102
Figura 32. (a) janela de comando da IHM e (b) terminal de interface [36].	107
Figura 33. Integridade do ativo, codificada em cores, no gêmeo digital. Condição da correia com base no ângulo de sobreposição: (a) excelente – azul, (b) boa – verde, (c) regular – amarelo, (d) ruim – laranja, (e) crítica – vermelho e (f) falha potencial – marrom [36].	109
Figura 34. Princípio de medição e principais componentes do sensor GP2Y0E03 [36].	111
Figura 35. (a) Unidade de medição; (b) sensor GY-521 MPU-6050; (c) princípio de medição [36].	112
Figura 36. Ajuste fino do modelo de linguagem autorregressivo utilizado na unidade de medição [36].	116
Figura 37. (a) Acurácia e (b) perdas apuradas ao final do treinamento. (c) Tempo de resposta do processo de amostragem [36].	117
Figura 38. Medições relacionadas à rotação: (a) Seno do ângulo de sobreposição: previsto ( $\text{sen}(\text{id}22)$ ), medido ( $\text{sen}(\text{id}17)$ ) e diferença ( $\text{sen}(\text{id}22) - \text{sen}(\text{id}17)$ ); (b) Velocidade angular de rotação da correia em rpm: calculada (id23), medida (id18) e diferença (id23 – id18); (c)	

Número absoluto de rotações da correia: calculada (id24), medida (id19) e diferença (id24 – id19) [36].	119
Figura 39. Medições relacionadas à amostra: (a) Diâmetro da correia em mm: calculado (id20), valor de referência (420), diferença (id20 – 420); (b) Posição da borda externa de sobreposição da correia: calculada (id21), valores possíveis (0 – indefinido, 1 – lado direito, 2 – lado esquerdo), valor de referência (1 – lado direito) [36].	120
Figura 40. Histogramas das diferenças: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].	122
Figura 41. Gráficos quantil-quantil das diferenças: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].	122
Figura 42. Gráficos de caixa das diferenças: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].	122
Figura 43. Diagramas de dispersão: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].	123
Figura 44. Gráficos de Bland-Altman: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].	123
Figura 45. (a) Histograma, (b) Gráfico quantil-quantil e (c) Gráfico de caixa para a diferença entre a medição do diâmetro (id20) e o valor de referência (420 mm) [36].	124
Figura 46. Problema de interpretação incorreta no monitoramento da rotação da correia. A alternância das bordas de sobreposição causou torção na correia e resultou em uma falha funcional, com conseqüente dobra da correia no tambor de retorno do transportador tubular. As imagens foram recoloridas para fins acadêmicos [59].	141

Figura 47. Técnicas típicas de medição para monitorar rotação da correia em transportadores tubulares [59]: marcadores magnéticos e identificadores por radiofrequência no topo da formação tubular [64] (a), marcadores magnéticos distribuídos na largura da correia [79] (b), marcadores magnéticos na base da formação tubular [65] (c), sensores de torque [219,220] (d), sensores laser [77] (e), sensores de detecção e alcance de luz [63] (f), processamento de imagem [221] (g), e o método proposto utilizando sensores de distância infravermelhos (h). .....	144
Figura 48. Arquitetura de rede para a digitalização do monitoramento da rotação da correia. Adaptado de [59]. .....	146
Figura 49. Protótipo físico [59]. .....	148
Figura 50. Aparato de medição independente da correia [59]. .....	150
Figura 51. Dispositivos de medição multiparâmetro [59]. .....	152
Figura 52. Pseudocódigo para monitorar o número absoluto de rotações da correia [59]. .....	154
Figura 53. Rede IIoT para monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares [59]. .....	161
Figura 54. Características-chave da IHM (a) e estados de integridade do ativo codificados por cores [59]: condição excelente (b), boa (c), regular (d), ruim (e), crítica (f) e acima do limiar adotado como falha potencial (g). As imagens (b–g) são exibidas em tamanho e resolução reduzidos para demonstrar o código de cores empregado. ....	168
Figura 55. Sistema multiparâmetro avançado para monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares. A IHM é exibida em tamanho e resolução reduzidos para fins de visualização geral [59]. .....	169
Figura 56. Faixa de medição para sensores de distância infravermelhos [59]. .....	170
Figura 57. Latência do aparato de medição [59]. .....	171
Figura 58. Resultados das medidas de ângulo [59]: sincronização pela diferença circular média pareada absoluta (a); ângulo previsto versus ângulo medido (b); comparação pareada	

utilizando a função seno (c); diagrama de dispersão após transformação de dados utilizando a função seno (d). .....	173
Figura 59. Comparação entre os valores calculados e os de teste do diâmetro da formação tubular (a) e do comprimento de sobreposição (b) [59].....	175
Figura 60. Posicionamento recomendado de unidades de medição para a digitalização do monitoramento da rotação da correia em uma aplicação prática de transportador tubular [59]. .....	176

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Recomendações de grau de enchimento para correias transportadoras tubulares [5].....	33
Tabela 2. Recomendações de raios mínimos de curvatura para correias transportadoras tubulares [5]. .....	35
Tabela 3. Dados do transportador tubular de curta distância selecionado [5]. .....	72
Tabela 4. Detalhes da rota do transportador tubular selecionado [5]. .....	77
Tabela 5. Forças de contato e torque de retenção da correia tubular em função do seu grau de enchimento harmonizado [5]. .....	79
Tabela 6. Levantamento de campo dos segmentos curvos de interesse [5]. .....	84
Tabela 7. Vida útil proposta para a substituição da correia tubular com base na avaliação das forças de contato [5]. .....	87
Tabela 8. Dados básicos de projeto do transportador de referência [36]. .....	94
Tabela 9. Lista de variáveis utilizadas na rede IIoT [36]. .....	101
Tabela 10. Exemplos de corpus rotulados amostrados na unidade de medição [36]. .....	105
Tabela 11. Critérios-chave para detectar estados inseguros relacionados à rotação da correia em transportadores tubulares [59]. .....	157
Tabela 12. Dispositivos e variáveis de rede IIoT [59]. .....	162
Tabela 13. Formatação do texto de solicitação para fins de ajuste fino [59]. .....	165
Tabela 14. Cálculos do número recomendado de unidades de medição [59]. .....	176
Tabela 15. Resumo dos resultados do processamento multiparâmetro [59]. .....	182
Tabela 16. Latência durante o treinamento e inferência [59]. .....	182
Tabela 17. Resultados do monitoramento da rotação da correia [59]. .....	183
Tabela 18. Avaliação qualitativa do objetivo geral e dos objetivos específicos da Tese de Doutorado. ....	187

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área de contato real	$m^2$
$A_0$	área de contato nominal	$m^2$
$a$	ponto de contato inicial entre o rolo e a correia tubular	-
$b$	ponto de contato final entre o rolo e a correia tubular	-
$B$	largura da correia	m
$c$	meia largura da superfície de contato parabolóide elíptica	m
$E_0$	módulo de equilíbrio do modelo generalizado de Maxwell	Pa
$E_i$	$i$ -ésimo elemento elástico (mola) do Modelo Generalizado de Maxwell	Pa
$E^*$	módulo de elasticidade complexo da correia	Pa
$E'_2$	módulo de armazenamento da correia na direção lateral	Pa
$E''$	módulo de perda da correia	Pa
$F_{Nstr}$	força de contato no segmento reto equivalente do transportador tubular	N
$F_N$	força normal	N
$F_{stif}$	força de formação da correia	N
$F_{Nstr(k,j)}$	força de contato do $j$ -ésimo rolo pertencente ao $k$ -ésimo painel fechado no segmento reto equivalente do transportador tubular	N
$F_{jadj}$	fator de ajuste do $j$ -ésimo rolo baseado no grau de enchimento da correia	-
$G_m$	força-peso do granel sólido manuseado	N
$G_b$	força-peso da correia	N
$G$	variância da distribuição de pressão na interface de contato	$Pa^2$
$g$	aceleração da gravidade	$m/s^2$
$h$	espessura da correia tubular	m
$h'$	espessura da camada de retorno da correia tubular	m

$j$	$j$ -ésimo rolo pertencente a um dado painel fechado do transportador tubular	-
$k$	$k$ -ésimo painel de rolos em um dado segmento fechado do transportador tubular	-
$k_c$	fator de criticidade	-
$k_i$	comprimento característico de relaxação	m
$k'$	janela de contexto composta pelas unidades de texto predecessoras	-
$L$	comprimento desenvolvido do transportador	m
$\log \mathcal{L}(\theta X)$	função log-verossimilhança	-
$\Delta_{ov}$	comprimento da sobreposição das bordas da correia fechada	m
$m$	número de elementos do Modelo Generalizado de Maxwell	-
$n_a$	número admissível de rotações da correia	-
$n_u$	número recomendado de unidades de medição	-
$A_{interf}$	área da região de interferência entre as funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal	-
$p$	pressão nominal de compressão na área de contato	Pa
$p_\theta$	probabilidade condicional	-
$R_{nom}$	raio nominal da correia tubular	m
$R_e$	raio efetivo da correia tubular	m
$R_1$	raio do rolo de um painel fechado	m
$R_2$	raio externo da correia tubular	m
$S(\omega)$	densidade de potência espectral devido à deformação da borracha sobre os rolos	Hz <sup>-1</sup>
$T$	coordenada de torque no plano de integração	N·m
$T_r$	torque de retenção para um determinado rolo	N·m
$T_{r(k)}$	torque de retenção do $k$ -ésimo painel de rolos	N·m

$T_{total(u)}$	torque de retenção total de um segmento fechado de um transportador tubular composto por $u$ painéis	N·m
$T_z$	comprimento da maior zona de transição	m
$t$	$t$ -ésima unidade de texto para uma janela de contexto	-
$T'$	número de unidades de texto em um corpus textual	-
$u$	número de painéis em um determinado segmento fechado do transportador tubular	-
$V_b$	velocidade escalar longitudinal da correia	m/s
$X$	corpus de texto completo	-
$x$	dimensão de um plano cartesiano tridimensional	-
$y$	dimensão de um plano cartesiano tridimensional	-
$z$	dimensão de um plano cartesiano tridimensional	-
$z_0$	profundidade máxima de indentação	m
$\langle z_p \rangle$	profundidade média de deformação da borracha	m
$w(x, y)$	profundidade de deformação viscoelástica da superfície de contato	m
$G_b$	força-peso da correia	N
$q$	densidade da correia	kg/m <sup>3</sup>
$Prob_{M>T}$	probabilidade do parâmetro momento rotacional ser maior que o parâmetro torque de retenção em um segmento fechado do transportador tubular	-
$OSI$	índice de estabilidade de sobreposição de um segmento fechado do transportador tubular	-

$f_{T_{total}(u)}(T)$	função de densidade de probabilidade suavizada por Kernel-normal do torque de retenção de um segmento fechado do transportador tubular	-
$f_{M_{rot}(u)}(T)$	função de densidade de probabilidade suavizada por Kernel-normal do momento rotacional da correia em um segmento fechado do transportador tubular	-
$F_{T_{total}(u)}(T)$	função de distribuição acumulada suavizada por Kernel-normal do torque de retenção de um segmento fechado do transportador tubular	-
$\sigma(x, y)$	distribuição de pressão na superfície de contato viscoelástica	Pa
$\sigma_0$	tensão normal aparente da área de contato macroscópica	Pa
$\theta$	vetor de parâmetros de um determinado modelo de transformador	-
$\eta_i$	$i$ -ésimo elemento viscoso (amortecedor) do modelo generalizado de Maxwell	Pa·s
$\mu_{adh}$	coeficiente de atrito por adesão	-
$\mu$	coeficiente de atrito entre o rolo e a cobertura de retorno da correia tubular	-
$\mu_{coh}$	coeficiente de atrito por coesão	-
$\mu_{hys}$	coeficiente de atrito por histerese	-
$\mu_{visc}$	coeficiente de atrito viscoso	-
$\mu_{(k,j)}$	coeficiente de atrito entre o $j$ -ésimo rolo pertencente ao $k$ -ésimo painel fechado e a cobertura de retorno da correia tubular	-
$\kappa$	inclinação média quadrática do perfil de rugosidade	-
$\nu$	coeficiente de Poisson da correia	-
$\nu_1$	coeficiente de Poisson da correia na direção longitudinal	-
$\nu_2$	coeficiente de Poisson da correia na direção lateral	-
$\rho$	densidade do granel sólido	kg/m <sup>3</sup>
$\tau'$	tensão de cisalhamento por atrito que atua na área de contato	Pa

$\tau$	vida útil remanescente da correia	%
$\tau_{dr}$	latência de detecção-resposta	s
$\tau_s$	tempo de parada segura da correia, com desaceleração controlada ou inercial	s
$\psi$	grau de enchimento da correia fechada, variando de 0% a 80%;	%
$\psi_{harm}$	grau de enchimento harmonizado da correia tubular	%
$\psi_m$	grau de enchimento mensurado da correia tubular	%
$\omega$	frequência angular da excitação induzida na borracha	Hz
$\omega_r$	velocidade crítica de rotação da correia	rpm
$v$	velocidade de deslizamento	m/s

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

Os processos de manuseio de granéis sólidos desempenham um papel importante na gestão de recursos naturais da Amazônia, compondo uma infraestrutura integrada de transportes nos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário, por meio de importantes corredores logísticos nacionais. Destes, destaca-se o corredor logístico do Arco Norte, que interliga processos de produção, exploração e beneficiamento da região aos Portos Organizados, Terminais de Uso Privado e Estações de Transbordo de Carga nos Estados de Rondônia, Amazonas, Pará, Amapá e Maranhão [1].

Entre os granéis sólidos agrícolas transportados via Arco Norte, destacam-se o milho, a soja e o farelo de soja, responsáveis por 38,5% das exportações totais desses grãos no primeiro semestre de 2025. Já entre os granéis sólidos não agrícolas, destacam-se o minério de ferro, o carvão mineral, o cimento, os fertilizantes e a bauxita. No âmbito do setor portuário nacional, os granéis sólidos representaram 59,2% da movimentação de cargas no mesmo período, mantendo, nos últimos anos, uma proporção estável por tipo de carga e uma média anual de crescimento de 3,4% [2].

Tais processos envolvem o transporte de matérias-primas, insumos, produtos e rejeitos em suas etapas logísticas internas, incluindo recebimento, transferência, armazenagem e expedição. Diferentes equipamentos são empregados nessas movimentações internas, incluindo máquinas móveis (caminhões, carregadeiras, escavadeiras, manipuladores, gruas etc.), vagões ferroviários, transportadores contínuos, ou uma combinação desses maquinários.

Nesse contexto, os transportadores de correia são amplamente utilizados entre os equipamentos de transporte contínuo e constituem uma vantagem competitiva em relação a

outros métodos de manuseio, segundo múltiplos critérios decisórios. Em um estudo comparativo entre diferentes métodos de transporte em uma mineração a céu aberto, ABBASPOUR e DREBENSTEDT [3] estabeleceram um índice ambiental composto pela concentração de poluentes atmosféricos (dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio), pelas emissões de material particulado (MP2.5, MP10 e MP30) e pelo consumo de água. Os autores compararam operações com escavadeiras e caminhões (em inglês: *truck-shovel*) com métodos que utilizam sistemas de britagem e transportadores de correia (em inglês: *In-Pit Crushing and Conveying*) e concluíram que todos os cenários que consideraram a utilização de transportadores de correia apresentaram melhores índices ambientais do que o cenário de referência com caminhões.

Além desses benefícios ambientais, a adoção de transportadores de correias em processos de manuseio de granéis sólidos apresenta diversas vantagens operacionais em relação ao uso de caminhões, conforme descrito por DE ALMEIDA *et al.* [4]:

- Menor risco operacional devido ao número reduzido de equipamentos;
- Menor taxa de falha associada a fatores humanos;
- Maior eficiência energética e menor pegada de carbono;
- Menores custos e mão de obra de manutenção e operação;
- Taxa de manuseio independente da distância de transporte;
- Operações menos sensíveis às intempéries.

Os transportadores de correia são comumente classificados em dois tipos: transportadores de correia aberta, que são a variante predominante em processos de manuseio; e transportadores de correia fechada, que incluem correias tubulares, dobráveis, suspensas e do tipo sanduíche.

## 1.1. MOTIVAÇÃO

### 1.1.1. Desafio da estabilidade em transportadores tubulares

A adoção de correias transportadoras fechadas para o manuseio de sólidos a granel desempenha papel importante na garantia de padrões sustentáveis de consumo e produção em processos logísticos, alinhados ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 (ODS 12) das Nações Unidas, que propõe a garantia desses padrões. Em termos gerais, correias transportadoras apresentam uma pegada de carbono significativa, que demanda o uso de borracha sintética e natural, reforços não biodegradáveis derivados do petróleo, diversos componentes químicos, elevado consumo de energia na fabricação e longas cadeias logísticas, além da geração de resíduos decorrentes de correias desgastadas. Nesse sentido, prolongar o ciclo de vida das correias e adotar critérios sustentáveis de projeto, Engenharia, operação e manutenção reduzem significativamente a necessidade de recursos e maximizam a geração de valor nos processos de manuseio de granéis sólidos. Quantificar a estabilidade operacional nesses processos é um desafio de Engenharia e exige uma análise detalhada dos modos de falha críticos, além de uma abordagem abrangente de gestão do ciclo de vida do transportador [5].

Transportadores tubulares são os mais prevalentes entre os transportadores de correia fechada, que incluem correias tubulares, dobráveis, suspensas e do tipo sanduíche. Esses equipamentos podem tolerar curvas horizontais e verticais estreitas, fornecendo soluções sustentáveis para processos de manuseio de sólidos em pó e a granel ambientalmente sensíveis ou topograficamente complexos [6]. Uma correia especialmente projetada, vedada pela sobreposição de suas bordas, envolve o material manuseado. A sobreposição das bordas precisa permanecer nas posições superior e inferior dos segmentos de carga e de retorno, respectivamente, para garantir a estabilidade operacional adequada da correia. Esse é o aspecto mais desafiador do processo de manuseio, que influencia o desempenho geral

de um transportador tubular e afeta a confiabilidade ao longo de todo o seu ciclo de vida, uma vez que a correia tende a rotacionar em segmentos curvos [7].

A capacidade da correia de manter uma formação tubular estável depende da sua rigidez transversal: quanto maior a rigidez, maior a capacidade de neutralizar o momento de rotação indesejado. Contudo, esse efeito é acompanhado de maiores perdas de energia e de aumento da resistência ao rolamento, incluindo a abertura indesejada das bordas da correia entre os painéis do transportador [8-10]. Além disso, o aumento do diâmetro da formação tubular e a maior deformação da borracha na superfície dos rolos do transportador, causados por uma maior rigidez transversal, podem levar ao aumento da tensão longitudinal na correia [11] e cargas concentradas localmente podem resultar em rotação incontrolável. A rotação é desencadeada por vários fatores, identificados empiricamente, e a variação na posição de sobreposição pode ser substancial, causando efeitos indesejáveis e consequências potencialmente catastróficas para os processos de manuseio.

Mudanças na posição de sobreposição são respostas mecânicas geradas pelas forças de contato desiguais entre a borracha vulcanizada da correia e os rolos do transportador, bem como pela geometria da seção transversal da correia fechada, decorrentes de um processo altamente não linear de dobra da correia do formato aberto para o formato tubular. A intensidade das forças de contato depende de diversos fatores [10] e as interações mútuas causam a rotação indesejável da correia. Assim, investigar essas causas e fatores contribuintes é fundamental [9]. Segundo MOLNAR *et al.* [10], a rotação da correia precisa ser limitada ao máximo possível e ajustada aos limites pré-estabelecidos; no entanto, esse fenômeno ainda não foi plenamente explicado, e as soluções práticas para o alinhamento da correia nem sempre são eficazes [12].

Vários autores mediram as forças de contato em transportadores tubulares. ZAMIRALOVA e LODewijks [7] desenvolveram um dispositivo de teste, composto por seis pontos de contato, para mensurar a rigidez de correias tubulares, com a finalidade de investigar o efeito do

diâmetro da formação tubular e da posição de sobreposição sobre as forças de contato. Eles compararam as diferenças entre correias têxteis e correias de cabos de aço. HÖTTE [13], SUN *et al.* [14], ZHANG e STEVEN [15] utilizaram uma abordagem semelhante de medição com seis pontos de contato. MOLNAR *et al.* [16] posicionaram sensores de medição em um painel hexagonal de um transportador tubular de teste para desenvolver um modelo de regressão linear múltipla que considerou a tensão longitudinal e o volume de material na correia devido ao seu grau de enchimento. Por sua vez, WANG *et al.* [17] utilizaram um aparato de teste para estudar as forças de contato atuantes em um transportador tubular por meio de uma análise de sensibilidade e de pesos atribuídos às variáveis, identificando o diâmetro da formação tubular e o grau de enchimento da correia como fatores-chave. XIAOXIA *et al.* [14] avaliaram a influência da forma construtiva de uma correia tubular sobre sua rigidez transversal e as forças de contato, utilizando um equipamento de teste, enquanto GUO *et al.* [18] exploraram a relação entre a força normal e a resistência à flexão, utilizando um dispositivo de medição de seis pontos. MOLNAR *et al.* [10,11,19-26] estudaram as forças de contato e suas dependências da tensão longitudinal, utilizando um dispositivo de teste especial, composto por uma região de transição da correia, do formato plano para o formato tubular. Em outra aplicação, MOLNAR *et al.* [27] analisaram as forças de contato de uma correia transportadora tubular estática, sob carga e a vazia, ao alterar a tensão longitudinal da correia. HÖTTE *et al.* [28] usaram um equipamento de teste para estudar o comportamento da força de formação em correias tubulares de diferentes construções e MOLNAR *et al.* [29] analisaram o efeito da assimetria das forças de contato nos alojamentos dos mancais dos rolos do transportador. BOMBASARO e ODDERA [30] avaliaram as forças de contato nos rolos de um transportador tubular de maior diâmetro, enquanto DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [31] desenvolveram um rolo instrumentado para medir a resistência ao rolamento por indentação e a força normal em um transportador tubular. Em outra aplicação, DE GRAAFF [32] utilizou uma estrutura hexagonal de madeira para medir as cargas radiais em uma amostra de correia tubular.

A abordagem experimental para mensurar as forças de contato tem sido utilizada para validar modelos analíticos e numéricos. Como exemplo, ZAMIRALOVA [12] propôs uma abordagem analítica inovadora para diversas condições de carregamento, combinando a análise por meio do método dos elementos finitos (MEF) com métodos experimentais para explorar as características de um transportador tubular que causam perdas de contato entre a correia e os rolos. Os modelos atuais acoplados (analítico-numéricos) constituem uma ferramenta valiosa para identificar o equilíbrio adequado entre a flexibilidade transversal da correia e a estimativa do consumo de energia. Entretanto, a rotação da correia continua sendo uma das principais preocupações de Engenharia, operação e manutenção ao longo de todo o ciclo de vida de um transportador tubular [33,34], e não há, até o momento, um método disponível para quantificar a estabilidade da correia [35].

#### 1.1.2. Desafio no monitoramento da rotação da correia

Monitorar a posição de sobreposição é uma tarefa crítica e complexa nesse contexto. Isso se deve ao elevado risco operacional e à substancial mão de obra necessária para a inspeção regular do transportador e para o alinhamento da correia. Portanto, a digitalização desse monitoramento desperta significativo interesse de pesquisa em processos de manuseio de grânéis sólidos, com potencial para proporcionar vantagem competitiva e maximizar a geração de valor [36]. Vários autores aplicaram conceitos da Indústria 4.0 a sistemas de manuseio por transportadores de correia. MENDES *et al.* [37-40] propuseram modelos de gestão que combinam manutenção produtiva total e filosofia enxuta, incorporando as tecnologias transformadoras da Indústria 4.0. Esses modelos foram implementados em estudos de caso práticos voltados ao monitoramento em tempo real de transportadores de correia. FEDORKO [41] introduziu o conceito de transportadores inteligentes na estrutura da Indústria 4.0, integrando sistemas ciberfísicos, a Internet das Coisas (em inglês: *Internet of Things – IoT*) e a Internet de Serviços. Esses sistemas empregam comunicação bidirecional de dados para gerenciar a integridade dos transportadores. JURDZIAK *et al.* [42] enfatizaram que a

tecnologia apropriada para o monitoramento de correias transportadoras e emendas já está disponível, introduzindo a ideia de transportadores 4.0, que consiste na aplicação dos conceitos da Indústria 4.0 a esses processos de manuseio. SIGOV *et al.* [43] destacaram novas tecnologias emergentes para a Indústria 4.0, incluindo a inteligência artificial (IA), as redes 5G e 6G e a computação quântica. Também é necessário considerar o surgimento da inteligência artificial generativa (em inglês: *Generative Artificial Intelligence – GenAI*) e seu potencial para impulsionar a digitalização dos processos de manuseio de granéis sólidos. VOß [44] destacou que a inteligência artificial generativa ainda deve ser comprovada em cenários práticos de problemas logísticos.

No que diz respeito à aplicação prática das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, vários estudos de caso demonstraram a viabilidade de implementar tais conceitos em processos de manuseio de granéis sólidos. FEDORKO *et al.* [45] propuseram 17 parâmetros-chave cruciais para a transformação digital dos processos de manuseio por transportadores tubulares, com destaque para a rotação da correia como um dos principais modos de falha. MICHALIK *et al.* [46] projetaram uma bancada de testes dinâmicos composta por um transportador tubular totalmente funcional para estudar os efeitos de diferentes condições operacionais. FEDORKO *et al.* [47] desenvolveram um gêmeo digital para medir as principais propriedades de correias tubulares têxteis, implementando um modelo por meio do método dos elementos finitos e uma bancada de testes estáticos. LODEWIJKS *et al.* [48] discutiram aplicações de Internet das Coisas e de macrodados (em inglês: *big data*) em processos de manuseio de granéis sólidos e apresentaram um estudo de caso sobre o monitoramento de temperatura em rolos com identificadores por radiofrequência (em inglês: *Radio Frequency Identification, RFID*). CARTER [49] apresentou tecnologias inovadoras de digitalização aplicadas a correias transportadoras, incluindo: o monitoramento remoto baseado no sensoriamento dos rolos; a inspeção por voos automatizados utilizando veículos aéreos não tripulados (VANT) equipados com câmeras infravermelhas e RGB (câmera de canais de cor vermelho, verde e azul; em

inglês: *red, green, blue*); e o monitoramento de perturbações acústicas ao longo da rota do transportador por meio de um cabo de fibra óptica interligado a um gerenciador, que se conecta à nuvem.

Quanto às tecnologias emergentes na Indústria 4.0, estudos de caso práticos com o uso de inteligência artificial abordaram com sucesso a prevenção, detecção e correção de importantes modos de falha na gestão desses ativos. HUANG *et al.* [50] desenvolveram um algoritmo de agrupamento baseado em densidade multissensor para monitorar danos na superfície de uma correia convencional, combinando uma câmera estéreo de alta definição com um sensor de detecção e alcance de luz (em inglês: *Light Detection and Ranging, LiDAR*). KLIPPEL *et al.* [51] integraram conceitos de inteligência artificial à computação de borda para detectar danos na superfície de uma correia convencional utilizando uma plataforma de prototipagem eletrônica com uma câmera RGB incorporada, treinamento na nuvem de uma rede neural profunda (em inglês: *deep neural network*) e inferência do modelo de aprendizagem de máquina (em inglês: *machine-learning model*) no próprio dispositivo. Alguns estudos aplicaram redes neurais multicamadas (em inglês: *multi-layer neural networks*) para processar dados de varredura de correias convencionais com reforços em cabos de aço, com o intuito de detectar danos nesses cabos [52,53]. GUO *et al.* [54] incorporaram aprendizado profundo por meio de redes adversárias condicionais de multiclassificação com consistência de ciclo (em inglês: *Cycle-Consistent Adversarial Networks – CycleGAN*) para processar imagens de alta resolução da superfície de uma correia convencional. ALHARBI *et al.* [55] apresentaram uma revisão abrangente sobre a aplicação de modelos de aprendizagem de máquina para detectar falhas em rolos de transportadores de correia com base em sinais acústicos e de vibração. STACHOWIAK *et al.* [56] desenvolveram um robô autônomo para detectar danos nas bordas de correias convencionais, desalinhamento e derramamento de material, por meio do processamento de gravações de vídeo e da aplicação do algoritmo de detecção de bordas de Canny (em inglês: *Canny edge detection algorithm*). Outros estudos

previram bloqueios em pontos de transferência de uma correia transportadora, utilizando uma rede neural recursiva (em inglês: *recursive neural network*) para analisar as anomalias espectrais de vibração do chute [57] e uma rede neural convolucional (em inglês: *convolutional neural network*) para analisar imagens do chute registradas por uma câmera RGB [58].

Embora apresente notáveis benefícios, a digitalização do monitoramento da posição de sobreposição em correias tubulares enfrenta desafios relevantes para sua implementação. O cenário operacional típico de um transportador tubular consiste em rotas de longa distância ou de topografia complexa, o que exige dispositivos de medição precisos, porém de baixo custo, para a criação de gêmeos digitais em vários pontos de interesse ao longo da rota do transportador.

### 1.1.3. Desafio para a digitalização industrial em larga escala

Em condições ideais, a correia de um transportador tubular deve operar com as posições de sobreposição das bordas nas regiões superior e inferior dos segmentos de carga e de retorno do transportador, respectivamente, sob quaisquer condições de enchimento admissíveis. Além disso, nenhuma rotação da correia deve ocorrer durante a partida ou parada inercial do transportador. Em aplicações práticas, entretanto, rotas complexas, variações operacionais e fatores ambientais resultam em forças de contato desiguais, o que desencadeia mudanças de posição que podem exceder os limites operacionais toleráveis. As consequências incluem desalinhamento da correia nos tambores do transportador, colapso da formação tubular ou operação permanente sob condições subótimas. Os impactos variam desde eventos baseados em incidentes, como aqueles relacionados a rasgos na correia, interrupções na produção ou lucros cessantes, até custos recorrentes, como a substituição da correia devido ao envelhecimento acelerado; custos ao longo do ciclo de vida, como atividades de detecção de falhas, monitoramento de sobreposição, substituição de roletes e perdas de energia; além

de custos associados à gestão de riscos, como cobertura de seguro e reputação organizacional [5,33,59].

A rotação da correia em um transportador tubular é um modo de falha crítico, causado por uma interação não linear complexa entre vários mecanismos de falha, para os quais se requer o monitoramento da posição de sobreposição ao longo do ciclo de vida do transportador. Tipicamente, a adoção desta tecnologia, em detrimento dos tradicionais transportadores de correia aberta, demanda inspeções regulares ao longo do percurso do transportador e rastreamento da posição de sobreposição ao longo do tempo para mapear fenômenos de rotação ou torção da correia [5]. Neste trabalho, adotou-se o termo "torção" para se referir a rotações de correia que acumulam uma ou mais rotações absolutas. A rotação da correia afeta o desempenho e a confiabilidade dos transportadores tubulares ao longo de toda a vida útil dos equipamentos [33,34].

A operação de transportadores tubulares é uma aplicação de missão crítica, e as tecnologias de nova geração têm o potencial de aprimorar sua digitalização por meio da integração de gêmeos ciberfísicos, da Internet Industrial das Coisas (IIoT) e da computação assistida por inteligência artificial generativa (IA generativa). O monitoramento da estabilidade da correia requer intervenção humana recorrente, e a escassez de dados de falha constitui um desafio comum nessa aplicação, devido à grande quantidade de variáveis dependentes com características altamente não lineares. Segundo RICHEY JR. *et al.* [60], esses desafios demandam elevada capacidade de computação assistida por IA generativa, e os autores propõem o uso de aprendizagem de máquina supervisionada como uma das abordagens para aplicações de gestão logística e de cadeia de suprimentos em contextos limitados pela disponibilidade de dados. FEDORKO *et al.* [61] destacaram, por meio de um estudo de caso, o papel da digitalização no suporte ao monitoramento de condições operacionais indesejáveis, sejam elas dinâmicas, estáticas ou combinadas. A abordagem experimental concentrou-se na assimetria da força de contato na zona de transição dos transportadores tubulares.

Dadas as características operacionais de transportadores tubulares, o aprendizado de padrões temporais e espaciais, predominantemente a partir de incidentes de rotação da correia, é impraticável ou intolerável sob as perspectivas de Engenharia e de gestão de riscos. Embora esta tecnologia, originalmente projetada e patenteada em 1979 por Kunio Hashimoto [62], tenha fornecido com sucesso soluções sustentáveis em todo o mundo, o monitoramento digital da posição de sobreposição permanece inexplorado. Custodiantes de equipamentos enfrentam desafios frequentes para manter a posição de sobreposição estável ao longo do ciclo de vida do transportador, especialmente durante o recomissionamento da correia após um reparo ou substituição.

As soluções comerciais [63-65] e as patentes publicamente disponíveis [66-87] propõem, em sua maioria, uma abordagem de detecção de falhas baseada em rotações da correia que excedam limites predefinidos. ZHAO *et al.* [88] desenvolveram um sistema de detecção de rotação da correia em transportadores tubulares baseado no processamento de imagens. Os autores propuseram uma arquitetura inovadora de aprendizagem com forma prévia (em inglês: *shape-prior learning*) para detectar a linha de sobreposição da correia e avaliar os limites predefinidos na semicircunferência superior da formação tubular. No caso de correias torcidas, essa condição pode levar a interpretações equivocadas em sistemas de monitoramento que dependem exclusivamente da detecção angular, o que representa um desafio tanto para inspeções humanas quanto para as digitalizadas. Além disso, soluções de monitoramento que dependem de componentes físicos incorporados ou inseridos ao longo das camadas internas da correia, como marcadores magnéticos ou laços de sensores indutivos, podem ser desativadas devido a danos nos componentes causados por roletes travados ou por contato com estruturas do transportador, ou mesmo pela substituição de seções da correia em atividades de reparo, resultando em limitações à manutenibilidade.

Portanto, o desenvolvimento de um modelo de digitalização constitui um tema de interesse de pesquisa, ao possibilitar maior adoção de abordagens baseadas em dados sintéticos ou aumentados na computação assistida por meio de gêmeos ciberfísicos.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um índice de estabilidade e digitalizar o monitoramento da posição de sobreposição da correia em um transportador tubular

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares;
- Estabelecer um índice de estabilidade de sobreposição e aplicar um estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância;
- Desenvolver um gêmeo digital por meio de um equipamento de teste de baixo custo para mensurar a rotação de uma amostra de correia tubular em ambiente de testes;
- Implementar uma rede de Internet Industrial das Coisas em arquitetura controlador-respondente para realizar uma interface homem-máquina em um equipamento de teste;
- Treinar um modelo de linguagem autorregressivo para prever a posição de sobreposição de uma correia tubular utilizando um equipamento de teste;
- Desenvolver um modelo de digitalização para viabilizar aplicações industriais em larga escala.

## 1.3. HIPÓTESES

A utilização de um índice de estabilidade e a digitalização do monitoramento da posição de sobreposição em um transportador tubular, por meio da implementação de gêmeos digitais, Internet Industrial das Coisas e modelos de linguagem autorregressivos, podem fornecer

parâmetros operacionais importantes e habilitar um novo conjunto de medidas preditivas nesse campo de pesquisa.

#### 1.4. CONTRIBUIÇÕES

A partir dessa hipótese de pesquisa, espera-se desenvolver uma solução de Engenharia que aprimore os processos de manuseio de granéis sólidos na região Amazônica nacional por meio das seguintes contribuições:

- Fomento e divulgação da tecnologia de manuseio de granéis sólidos por transportadores tubulares;
- Ampliação da base de conhecimento atual referente ao modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares;
- Exploração econômica de novas soluções para o monitoramento da posição de sobreposição em transportadores tubulares;
- Adoção de modelos de linguagem autorregressivos em sistemas de monitoramento para transportadores tubulares.

#### 1.5. METODOLOGIA

A partir dos objetivos desse projeto, adotou-se o método de pesquisa explicativa para analisar o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares. Isso permitiu identificar os fatores determinantes da ocorrência do fenômeno em estudo e estabelecer um índice de estabilidade de sobreposição. Em seguida, aplicou-se o procedimento técnico do estudo de caso a um transportador tubular curvo de curta distância para avaliar o modelo proposto. Finalmente, aplicou-se o procedimento técnico da pesquisa experimental, com o desenvolvimento de bancadas de testes e a observação dos efeitos das variáveis selecionadas sobre o objeto de pesquisa.

## 1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta as considerações iniciais da pesquisa, incluindo a motivação e os objetivos, as hipóteses e as contribuições, a metodologia e os procedimentos técnicos adotados, bem como a forma de organização do trabalho.

Os Capítulos 2, 3 e 4 incorporam artigos científicos completos por meio do modo de agregação. Essa modalidade está em conformidade com a Resolução CONSEPE nº 4.932, de 20 de junho de 2017, que aprovou o Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERNA), no nível de Doutorado Acadêmico. Esse normativo foi promulgado pelo Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão (CONSEPE), órgão vinculado à Secretaria Geral dos Conselhos Superiores Deliberativos (SEGE) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Os textos são traduções não oficiais das publicações de DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [5,36,59], com ajustes gramaticais e descritivos para adequação à língua portuguesa, sem alteração do conteúdo e da mensagem original. Para favorecer a cadência ao leitor, trechos da introdução de cada artigo científico são apresentados na seção de motivação do Capítulo 1, agrupados da seguinte forma: desafio da estabilidade em transportadores tubulares [5], desafio no monitoramento da rotação da correia [36] e desafio para a digitalização industrial em larga escala [59].

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares e propõe um método analítico para o cálculo de um índice de estabilidade de sobreposição, por meio de um estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da posição de sobreposição da correia em um transportador tubular, utilizando gêmeos digitais, Internet Industrial das Coisas e modelos de linguagem autorregressivos, por meio de uma bancada de

testes e de uma amostra de correia de um transportador tubular de longa distância, comissionado e operacional.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento de um modelo de digitalização para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares. O capítulo descreve as hipóteses formuladas sobre os princípios tecnológicos que definem os requisitos mínimos do sistema, bem como as tecnologias habilitadoras adotadas para fomentar a inovação.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais da pesquisa, bem como as conclusões e as perspectivas gerais do estudo. As discussões e análises dos resultados obtidos são detalhadamente abordadas nas respectivas seções dos Capítulos 2, 3 e 4.

O Apêndice A contém um glossário de tradução de termos técnicos do português para o inglês. O Apêndice B apresenta as correções nos textos agregados em relação às versões publicadas. O Apêndice C apresenta o checklist utilizado durante a realização do estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância, incluindo o registro fotográfico da atividade.

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO DA LITERATURA E MÉTODOS ANALÍTICOS

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares e propõe um método analítico para o cálculo de um índice de estabilidade de sobreposição, por meio de um estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância. O texto é uma tradução não oficial da publicação de DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [5] e contém ajustes gramaticais e descritivos para adequação à língua portuguesa, sem alteração do conteúdo e da mensagem original.

#### 2.1. TÍTULO DA PUBLICAÇÃO

Rotação da correia em transportadores tubulares: análise do modo de falha e avaliação da estabilidade da posição de sobreposição.

#### 2.2. RESUMO DO CAPÍTULO

Transportadores tubulares fornecem soluções sustentáveis para processos de manuseio de pós e sólidos a granel ambientalmente sensíveis ou topograficamente complexos; entretanto, a rotação da correia está entre os modos de falha mais críticos desses equipamentos, influenciando as atividades de Engenharia, operacionais e de manutenção ao longo de seus ciclos de vida. As mudanças na posição de sobreposição da correia fechada são respostas mecânicas às forças de contato desiguais entre a borracha vulcanizada e os rolos do transportador, decorrentes de um processo altamente não linear de dobra da correia do formato aberto para o formato tubular, e não há, atualmente, método disponível para quantificar tal estabilidade. Analisou-se o modo de falha da rotação de uma correia tubular e propôs-se um modelo linear e um índice de estabilidade de sobreposição (em inglês: *Overlap Stability Index – OSI*) para avaliar a resiliência da correia por meio de um estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância. A proposta considerou um modelo de

interferência entre o momento rotacional simulado da correia em um segmento curvo e o torque de retenção do transportador, calculado para um segmento reto teórico equivalente, utilizando funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal. Com base em simulações, adaptou-se o modelo para incorporar fatores de ajuste relativos ao grau de enchimento, ao efeito da sobreposição das bordas na força de formação, à vida útil remanescente da correia, além dos coeficientes de atrito entre a camada de retorno da correia e os rolos do transportador, devido à adesão e à histerese. Por meio de um estudo de caso, desenvolveu-se um programa de computador para calcular o torque de retenção e o momento rotacional de uma correia, processando dados operacionais reais, forças de contato simuladas e parâmetros relevantes do equipamento. Essa análise identificou a redução da rigidez transversal e o aumento das tensões longitudinais nessa correia como as causas raiz das mudanças de posição, com perda de contato nos rolos superiores das seções curvas 10, 13, 15–16 e 17 do transportador. Os fatores contribuintes incluíram pontos com forças de contato aumentadas durante os estágios iniciais da vida útil da correia na seção curva 15–16, que apresentou condições instáveis devido ao aumento de sua força de abertura, com um *OSI* de 0,8657. Além disso, propuseram-se planos de ações corretivas e preventivas, um intervalo de substituição otimizado para a correia e recomendações de alterações de projeto, de acordo com as normas pertinentes.

### 2.3. INTRODUÇÃO

Analisaram-se as questões relevantes de Engenharia, operação e manutenção para prevenir e lidar com o modo de falha da rotação da correia ao longo dos diferentes estágios do ciclo de vida de um transportador tubular. Pesquisaram-se publicações importantes nos principais bancos de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares sobre esse tópico e as normas aplicáveis a projetos de transportadores tubulares. Além disso, propôs-se um modelo linear para avaliar a resiliência da posição de sobreposição por meio de um estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância utilizado em um sistema de

manuseio de carvão mineral betuminoso a granel. Desenvolveu-se um programa de computador para implementar o método proposto, processando dados reais de operação, forças de contato simuladas com o programa especializado *Belt Analyst*, versão 20.1.3.0, parâmetros relevantes do equipamento e a vida útil remanescente da correia. Posteriormente, realizou-se uma inspeção de campo nos segmentos críticos do transportador, o que permitiu identificar as causas raiz, analisar os fatores contribuintes e definir planos com ações corretivas e preventivas.

#### 2.4. ANÁLISE DO MODO DE FALHA

A rotação da correia tubular é um modo de falha caracterizado por uma variação na posição de sobreposição de suas bordas ao longo do eixo longitudinal, a partir de uma posição-alvo [33]. Esse modo de falha pode se manifestar nos segmentos de carga ou de retorno do transportador, nos quais se espera que a sobreposição das bordas se mantenha nas posições superior e inferior, respectivamente. A posição superior é tipicamente indicada como “0°” ou “12 horas” em aplicações de campo, e sua variação usualmente tem como referência o sentido horário na direção do fluxo do material manuseado. A Figura 1 (a–d) apresenta um critério de referência típico, adotado para avaliar a posição de sobreposição de uma correia tubular. A Figura 1a ilustra a posição esperada da sobreposição no segmento de carga (posição superior, ou “0°”) e no segmento de retorno (posição inferior, ou “180°”) de um transportador tubular. Durante as operações regulares, as mudanças de posição podem ser avaliadas considerando como referência a numeração dos rolos nos segmentos fechados do transportador (sobreposição na posição 4 do segmento de carga, conforme ilustrado na Figura 1b), a referência em graus (sobreposição no ângulo “0°” do segmento de carga, conforme ilustrado na Figura 1c), ou a referência em horas (sobreposição às “12 horas” do segmento de carga, conforme ilustrado na Figura 1d).

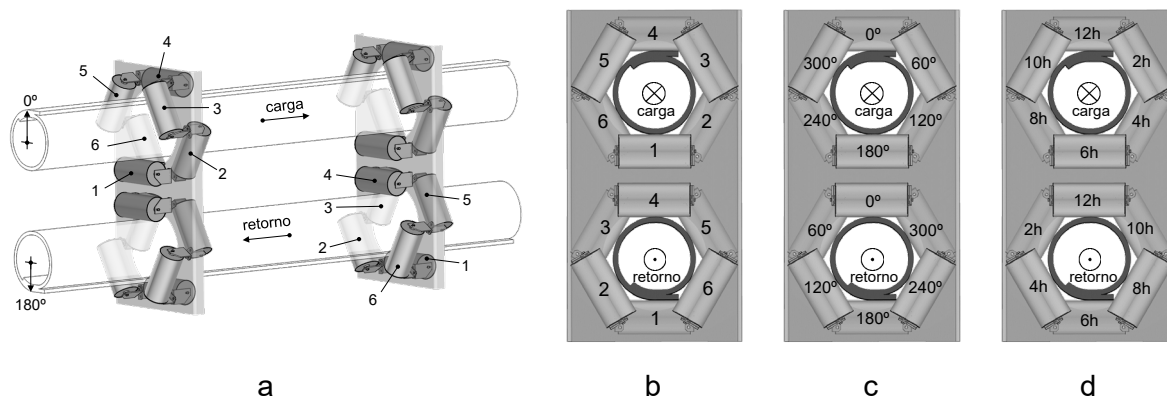


Figura 1. (a) Posição de sobreposição das bordas em uma correia tubular; (b) referência na numeração dos rolos; (c) referência em graus; (d) referência em horas [5].

A rotação da correia pode ser substancial, com algumas experiências práticas de rotações superiores a  $360^\circ$  registradas. Esse fenômeno é um dos modos de falha mais críticos dos transportadores tubulares, para os quais se espera que o monitoramento e o alinhamento da correia ocorram ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento. A Figura 2 (a–c) ilustra exemplos de rotação da correia.

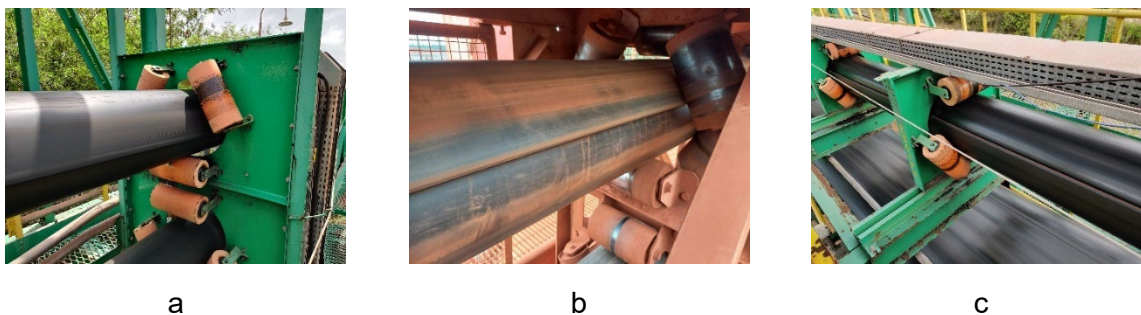


Figura 2. Exemplos de rotação em correias tubulares: (a) correia têxtil com sobreposição a  $90^\circ$ ; (b) correia com reforço em aramida, com sobreposição a  $60^\circ$ ; (c) correia com reforços em cabos de aço com sobreposição a  $60^\circ$  [5].

A correia tubular tende a rotacionar em segmentos curvos devido às forças de contato atuantes, sobretudo as laterais [10]. Essa condição indesejável pode persistir após a passagem pelos segmentos curvos [7], causando o desalinhamento da correia na zona de transição, região do transportador onde a correia é aberta e guiada até o tambor de descarga.

Num pior cenário, essa condição pode resultar no desalinhamento persistente nos segmentos planos do transportador ou no colapso da formação tubular, com consequências catastróficas para as operações de manuseio, conforme mostrado na Figura 3 (a–e).

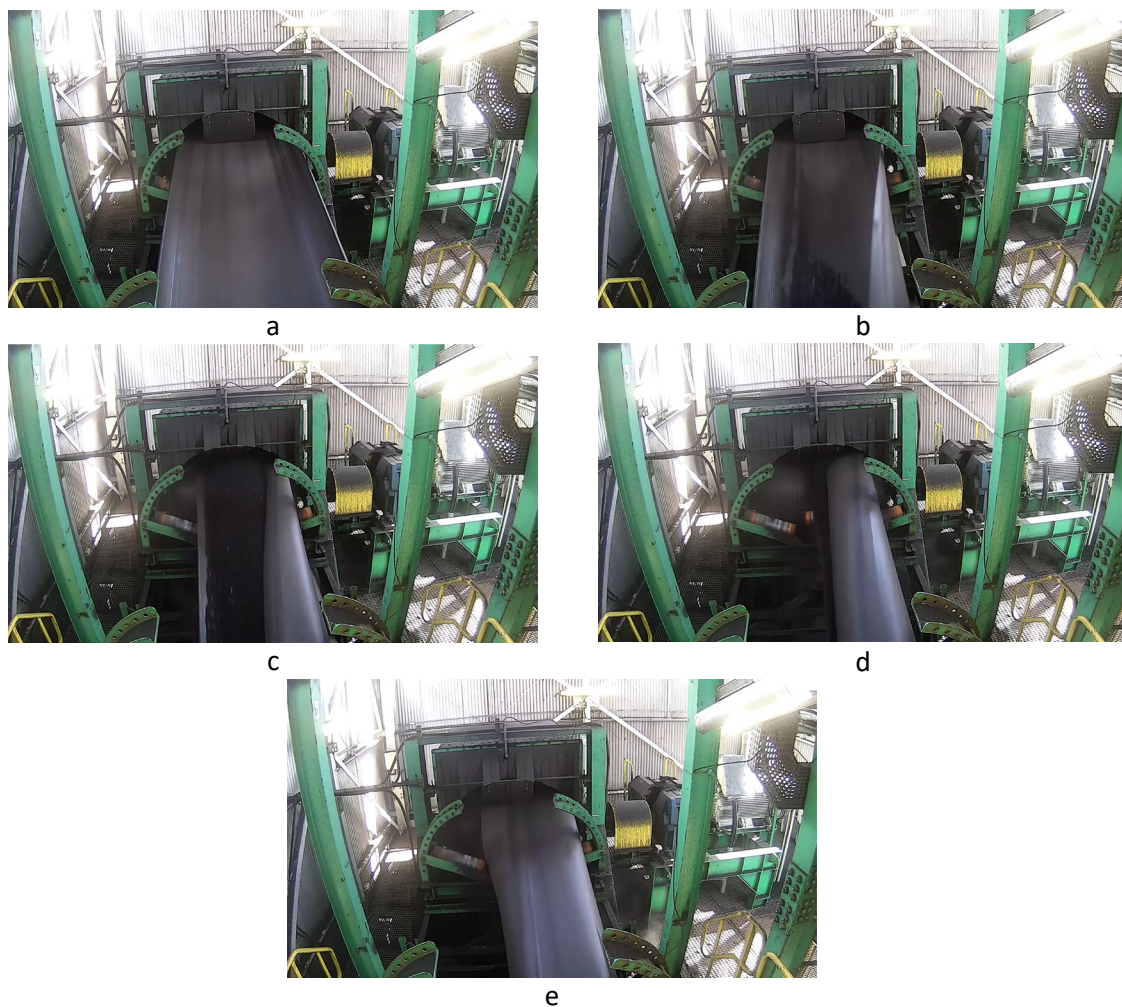


Figura 3. Desalinhamento e torção de uma correia tubular têxtil em um tambor de descarga, 6 segundos após o início de uma condição anormal: (a) condição inicial; (b) dobra da correia; (c) colapso da formação tubular; (d) torção da correia; (e) inversão de posição das coberturas da correia no transportador [5].

A Figura 3 (a–e) ilustra um exemplo de desalinhamento, seguido de torção, de uma correia tubular têxtil em um tambor de descarga. A correia apresentou rotação à esquerda (Figura 3a), que desencadeou um desalinhamento progressivo para a direita no segmento plano. Ocorreu, então, a dobra da correia (Figura 3b), seguida do colapso da formação tubular

(Figura 3c). O equipamento continuou em funcionamento, ocasionando o giro da correia para o centro do cavalete (Figura 3d) e a reabertura da correia, com a inversão de posição de suas coberturas no transportador (Figura 3e). Ao analisar as gravações em vídeo do evento, verificou-se que o colapso da formação tubular ocorreu apenas seis segundos após o desalinhamento da correia para a direita no segmento plano.

Ademais, mudanças na posição de sobreposição podem levar a efeitos secundários, conforme mostrados na Figura 4 (a–f), que incluem:

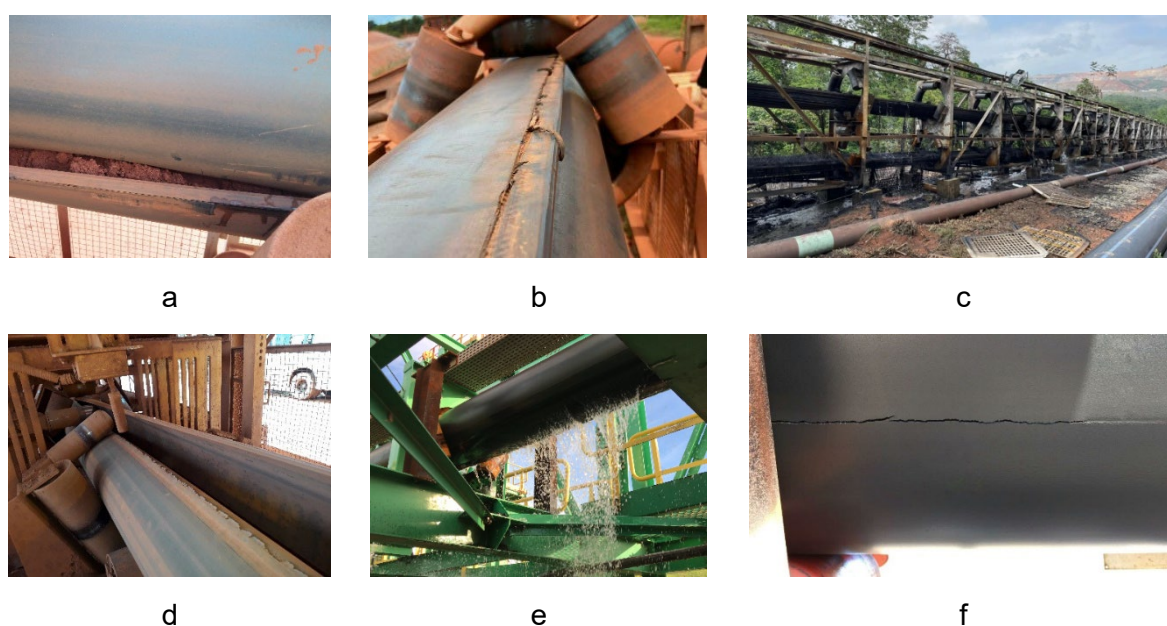


Figura 4. Efeitos secundários da rotação da correia em transportadores tubulares: (a) derramamento de material a granel; (b) danos nas bordas da correia; (c) incêndio no transportador de correia; (d) desgaste na borda interna da correia; (e) entrada de águas pluviais; (f) propagação de fissuras na correia [5].

- Derramamento de granel sólido ou emissão de particulado: A rotação da correia pode comprometer a eficiência da vedação das bordas, levando ao derramamento do granel sólido [8] ou à emissão de particulado nas regiões rotacionadas.
- Danos às bordas da correia: A rotação da correia pode danificar sua borda externa devido ao pinçamento da correia no espaçamento entre dois rolos adjacentes (no caso

do arranjo em linha dos rolos nos painéis fechados) ou ao atrito da correia com a face lateral dos rolos do transportador (no caso do arranjo alternado dos rolos nos painéis fechados).

- Incêndio no transportador: Falhas prematuras nos rolos, causadas por pinçamento da correia, bem como a fricção entre a correia e as faces laterais dos rolos ou das estruturas, podem desencadear incêndios no transportador, que se propagam facilmente dentro da instalação devido ao movimento da correia [89].
- Desgaste nas bordas da correia: A rotação pode ocasionar estresse mecânico nas bordas da correia tubular devido à força-peso e à fricção do material manuseado, o que leva ao desgaste prematuro e compromete a capacidade de vedação da correia.
- Entrada de águas pluviais: Os segmentos de carga são suscetíveis à contaminação do material manuseado pela água da chuva quando ocorre a rotação da correia, o que é particularmente relevante para equipamentos expostos a longas paradas com a correia em posição rotacionada.
- Propagação de fissuras na superfície da correia: A deformação dinâmica na direção radial, resultante da rotação da correia, favorece a propagação de fissuras na cobertura de retorno, o que acelera o envelhecimento por ataque oxidativo [90].

#### 2.4.1. Causas e fatores contribuintes

Considerações de Engenharia e de projeto são cruciais para evitar rotações excessivas ou incontroláveis da correia em transportadores tubulares. O projeto e as especificações adequadas do equipamento garantem um comissionamento satisfatório e uma fase operacional estável. As forças de contato afetam o torque de retenção (estabilizador) da correia tubular, neutralizando seu momento rotacional [7]. As forças de contato diminuem ao longo do tempo devido ao aumento da flexibilidade transversal da correia. Esse efeito é esperado e decorre do movimento repetitivo de flexão da correia tubular [91], o que exige o gerenciamento adequado da operação e da manutenção ao longo de seu ciclo de vida. A

tradução inadequada de requisitos em especificações nas fases conceituais do projeto pode gerar obstáculos, ainda que inadvertidamente, ao longo do ciclo de vida do transportador, o qual também é afetado por rotinas operacionais e de manutenção deficientes ou omissivas após a entrega do projeto. A lista não exaustiva a seguir detalha diversas causas e fatores contribuintes que podem levar à rotação incontrolável da correia em transportadores tubulares.

#### 2.4.1.1. Ventos fortes

Ventos fortes podem causar a rotação da correia em transportadores tubulares [6,92] devido às mudanças repentinas nas forças laterais, o que, em última análise, modifica as forças de contato com os rolos do transportador. Os projetistas e engenheiros devem considerar esse efeito, de modo que o alinhamento da correia não seja afetado tanto em carga nominal quanto em operação a vazio [6]. Caso necessário, a proteção da estrutura deve ser considerada e pode ser aplicada apenas lateralmente para otimizar o custo de capital, contemplando os segmentos afetados pela velocidade excessiva do vento.

#### 2.4.1.2. Chuvas intensas

Chuvas intensas podem causar a rotação severa da correia em transportadores tubulares [6] [92] devido às mudanças repentinas no fator de atrito entre a cobertura de retorno da correia e a carcaça dos rolos do transportador. Esse efeito pode ser facilmente observado pela diminuição da corrente elétrica motriz durante chuvas intensas em aplicações práticas, seguida da rotação da correia nos segmentos curvos do transportador. Para cenários operacionais em que se espera que o manuseio continue sob condições climáticas adversas, a proteção do equipamento contra as intempéries deve ser considerada [6]. Se chuvas intensas constituírem uma variável de preocupação, mesmo que seja fornecida proteção, recomenda-se a aplicação de métodos de teste em amostras da correia de acordo com a norma ISO 1817:2022 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of the effect of*

*liquids* (em português: Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Determinação do efeito de líquidos) [93], considerando os potenciais efeitos de envelhecimento acelerado da correia causados pela chuva ainda nos estágios conceituais de projeto.

#### 2.4.1.3. Temperaturas abaixo de zero

A resistência rotacional dos rolos e a rigidez transversal da correia aumentam durante as operações em clima frio (temperaturas abaixo de 0 °C), resultando em alterações nas forças de contato e no aumento da resistência ao rolamento por indentação, devido à diminuição da temperatura [91,94]. A partida do transportador, em velocidade nominal, após paradas prolongadas em baixas temperaturas, pode ser limitada ou até mesmo danificar a correia tubular. Projetistas e engenheiros devem considerar o uso de plastificantes adequados e de polímeros de baixa transição vítrea no projeto da correia, bem como selecionar uma graxa adequada para climas frios para os rolamentos usados nos rolos do transportador [6,95]. Caso sejam esperadas paradas prolongadas regulares do equipamento nessas condições, recomenda-se a adoção de um método de partida suave (velocidade de inspeção) para evitar rotações da correia e danos durante as partidas. Orientações sobre métodos de teste para as propriedades de borrachas vulcanizadas à baixa temperatura estão disponíveis na norma ISO 18766:2014 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Low temperature testing – General introduction and guide* (em português: Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Teste à baixa temperatura – Introdução geral e guia) [96].

#### 2.4.1.4. Luz solar, ozônio, oxigênio e calor

Sob tensão, os compostos de borracha tendem a secar, gerando pequenas fissuras quando expostos à luz solar intensa, ao ozônio e ao calor por períodos prolongados [97,98]. A temperatura ambiente elevada ativa e acelera a oxidação em compostos de borracha, diminuindo a vida útil da correia à nucleação e aumentando a taxa de crescimento de trincas por fadiga, independentemente do envelhecimento natural da borracha ou de seus processos

contínuos de vulcanização [99]. Os compostos de borracha utilizados nas coberturas de retorno das correias tubulares são altamente dependentes da temperatura e da frequência de carregamento [91,94], e um aumento da temperatura reduz a resistência ao rolamento da correia, diminuindo suas forças de contato e favorecendo a rotação.

A exposição ao ozônio aumenta a taxa de crescimento de fissuras, causando cisão na cadeia polimérica ao reagir com ligações duplas carbono-carbono [99]. O processo de envelhecimento da correia é iniciado na superfície de sua cobertura de retorno e se expande do meio para ambas as bordas [100]. Devido à ciclagem da correia, a película fina oxidada na superfície da cobertura de retorno se rompe, expondo a área de borracha nova e propagando a reação oxidativa [100]. A exposição ao oxigênio diminui o limiar de crescimento de trincas por fadiga mecânica, e o oxigênio dissolvido na borracha altera sua estrutura elastomérica ao longo do tempo, causando fragilização e encurtando irreversivelmente sua vida à fadiga [99]. Ademais, a reação fotoquímica causada pela luz solar ultravioleta promove a oxidação da superfície da cobertura de retorno da correia tubular, o que desencadeia o crescimento de trincas por fadiga [101,102].

Se essa for uma variável de preocupação, recomenda-se a aplicação de métodos de teste de acordo com a norma ISO 703:2017 *Conveyor belts – Transverse flexibility (troughability) – Test method* (em português: Correias transportadoras – Flexibilidade transversal – Método de teste) [103] para amostras de correias, considerando as temperaturas de pico, para estimar as variações da força de contato durante as etapas conceituais de projeto. Recomenda-se também a aplicação dos métodos de teste de acordo com a norma ISO 188:2023 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Accelerated ageing and heat resistance tests* (em português: Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Envelhecimento acelerado e testes de resistência ao calor) [104]; norma ISO 1431-1:2022 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Resistance to ozone cracking – Part 1: Static and dynamic strain testing* (em português: Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Resistência à fissura por ozônio – Parte 1: Teste de

deformação estática e dinâmica) [90]; norma ISO 6943:2017 *Rubber, vulcanized – Determination of tension fatigue* (em português: Borracha vulcanizada Determinação da fadiga por tensão) [105]; e norma ISO 27727:2008 *Rubber, vulcanized – Measurement of fatigue crack growth rate* (em português: Borracha vulcanizada – Medição da taxa de crescimento de trincas por fadiga) [106]. Para tais cenários operacionais, a proteção contra a incidência direta de luz solar na correia ou a adoção de uma cobertura de retorno especial para mitigar esses efeitos deve ser considerada nas fases conceituais. A Figura 5 (a–d) ilustra exemplos de propagação de trincas em uma correia utilizada em um transportador tubular.



Figura 5. Propagação de trincas em correias transportadoras tubulares. (a, b) Película fina oxidada na superfície da cobertura de retorno; (c, d) Crescimento e nucleação de fissuras [5].

#### 2.4.1.5. Parada prolongada do transportador

Diferentes fatores operacionais podem exigir a parada prolongada de um transportador tubular ao longo de seu ciclo de vida, como parte dos requisitos do sistema ao qual pertence. Isso pode ser causado por uma programação de manutenção, uma parada sazonal da unidade, regulamentação ou leis locais, uma diminuição da demanda do mercado ou pela capacidade ociosa do sistema de manuseio.

Sob tais condições, a correia permanece exposta às intempéries e ao envelhecimento natural, sem realizar ciclos de abertura. Isso pode reduzir a força de abertura das seções da correia posicionadas nos segmentos fechados e a flexibilidade transversal nas zonas de transição. Além disso, a resistência rotacional dos rolos aumenta devido ao intemperismo e ao armazenamento por longo prazo [89], o que pode exigir tempo adicional de funcionamento do

transportador para estabilizar a perda por atrito nos rolos a um valor constante após uma parada prolongada [95].

Isso pode levar à rotação da correia por duas razões distintas: (i) redução da força de abertura do trecho de correia posicionado nos segmentos fechados do transportador durante uma parada prolongada, ou (ii) variação da força de abertura nos trechos de correia que permaneceram abertos nas zonas de transição do transportador durante esse período. Medidas preventivas podem incluir o funcionamento regular a vazio do equipamento para alternância de posição da correia entre segmentos fechados e zonas de transição do transportador, bem como o uso de um método de partida suave (ou velocidade de inspeção) durante o acionamento da correia.

O custo de energia para a operação regular a vazio da correia, com fins preventivos, deve ser considerado parte dos custos de operação e manutenção do transportador, ainda nas fases conceituais de projeto. Boas práticas podem incluir a marcação da cobertura de retorno da correia com tinta branca em pontos específicos para orientar os operadores e mantenedores na alternância da posição, de tal modo a garantir que o trecho de correia posicionado no segmento de carga do transportador durante uma parada prolongada seja movido para o segmento de retorno na próxima operação de reposicionamento à vazio, bem como assegurando que os trechos de correia posicionados nas zonas de transição sejam reposicionados em segmentos fechados do transportador.

#### 2.4.1.6. Pó ou granel sólido de difícil fluidez

A fluidez do material é um dos parâmetros mais importantes a considerar ao projetar um sistema de manuseio de pó ou de granel sólido. As tensões induzidas no material variam em todas as direções [107]. Suas características multidimensionais dependem de uma combinação de propriedades físicas, condições ambientais e da seleção de equipamentos [108].

O teor de umidade é a principal variável de preocupação nos processos de manuseio, e seu aumento reduz a fluidez do material, formando pontes líquidas nos espaços vazios entre as partículas, além de aumentar as forças de coesão e adesão [108-111]. A fluidez do material manuseado reduz-se a uma taxa menor após o teor de umidade atingir a primeira região de saturação. No entanto, se o limite de saturação for atingido, a tensão superficial do líquido desaparece e o sólido úmido se transforma em suspensão [112], conforme mostrado na Figura 6 (a–d). Isso é particularmente sensível em processos com alta variabilidade no teor de umidade e pode afetar o perfil de carregamento da correia em um transportador tubular.

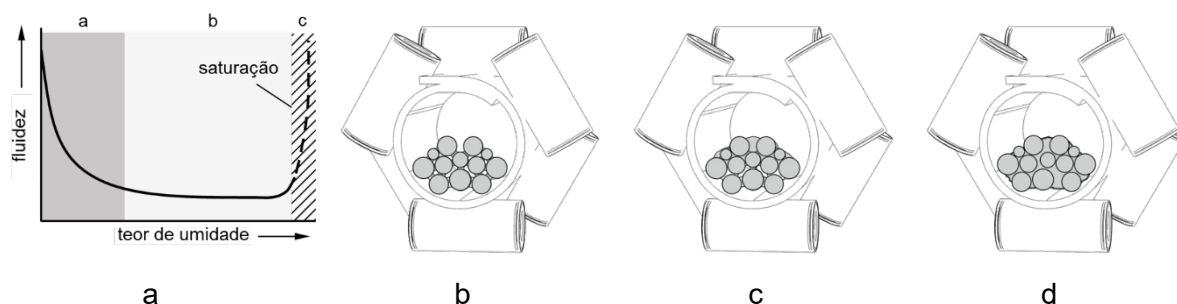


Figura 6. (a) Fluidez de sólidos em transportadores tubulares em função do teor de umidade: região a – pontes líquidas, região b – pontes líquidas e material saturado e região c – material saturado; detalhes da seção transversal de uma correia transportadora tubular com: (b) pontes líquidas; (c) pontes líquidas e material saturado; (d) material saturado [5].

A Figura 6a ilustra a fluidez de sólidos em transportadores tubulares em função do teor de umidade em três regiões: formando pontes líquidas nos espaços vazios (região a, conforme ilustrado na Figura 6b), a primeira região saturada (região b, conforme ilustrado na Figura 6c) e, finalmente, o limiar de saturação, onde o volume úmido se transforma em suspensão (região c, conforme ilustrado na Figura 6d).

O perfil de carregamento da correia em um transportador tubular é influenciado por diversos fatores, incluindo as curvas do transportador, o espaçamento entre painéis fechados, a inclinação do transportador, a flecha entre os rolos, a tensão longitudinal da correia, a velocidade da correia e as vibrações do equipamento ao longo da rota [6]. Sólidos a granel

saturados podem modificar o momento rotacional da correia em curvas horizontais estreitas, favorecendo, assim, sua rotação. Curvas verticais ou inclinações podem resultar em pontos com maior grau de enchimento, aumentando a pressão localizada e gerando um momento de rotação devido às forças de contato desiguais distribuídas longitudinalmente, conforme exemplificado na Figura 7 (a–c).

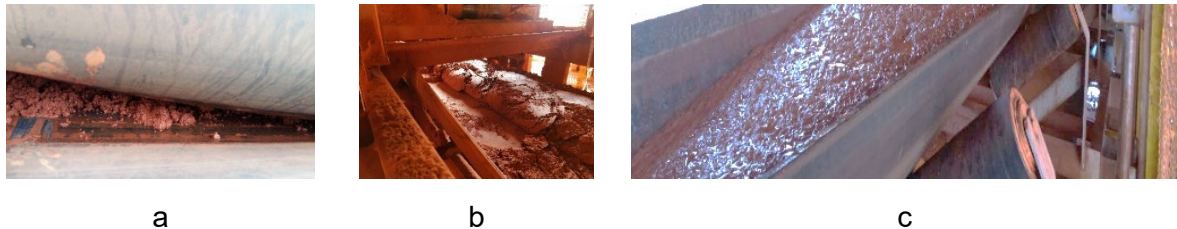


Figura 7. Forças de contato desiguais decorrentes da saturação do material. (a) material saturado na região de sobreposição das bordas da correia; (b) enchimento excessivo da correia por material saturado; (c) material saturado na região de carregamento da correia tubular [5].

A quantificação da fluidez deve ser considerada para materiais em pó ou a granel, incluindo a avaliação do tamanho e da distribuição das partículas, do ângulo de repouso, da densidade aparente, do ângulo de atrito interno, da coesão, da adesão e da compressibilidade [108] [112]. Medidas preventivas podem incluir a adoção de carregamento da correia em fluxo mássico, a minimização do tempo de residência no abastecimento a montante do transportador, bem como a redução das forças de impacto e da velocidade de transferência no chute de carga. Outras medidas incluem a diminuição do grau de enchimento, combinada à redução da velocidade da correia. Essa última abordagem exige a adoção de diâmetros maiores, para os quais é necessária atenção à flexibilidade transversal da correia tubular.

#### 2.4.1.7. Materiais desaguados

Os materiais desaguados, como o resíduo de bauxita, são tipos especiais de sólidos a granel de difícil fluidez. A pressão capilar líquida remanescente após o deságue causa maior resistência à tração e propriedades de fluxo menos favoráveis. Quando envolvida por uma

correia tubular, a compactação pode saturar o volume úmido, provocando a rotação da correia nos segmentos curvos do transportador [112].

Para reduzir o risco de operar próximo ao limite de saturação, o teor de umidade pode ser reduzido e controlado nos processos a montante, a custo do aumento das emissões de particulado nos pontos de transferência. Portanto, recomenda-se determinar a umidade de extinção do particulado do material desaguado a ser manuseado, a fim de estabelecer as condições ideais de operação ainda nos estágios iniciais do projeto [113]. Além disso, o uso do método dos elementos discretos (MED) e da dinâmica de fluidos computacional (DFC) para projetar os chutes de transferência é uma abordagem comprovada para controlar as emissões de particulados em sistemas de manuseio [114,115]. Medidas secundárias podem incluir o confinamento das regiões de transferência com vedações e tiras de borracha, bem como o uso de aspersores de neblina, que pulverizam água ou produtos químicos para reduzir o teor de particulados em suspensão.

#### 2.4.1.8. Degradação pelo material manuseado

A interação entre o material manuseado e a cobertura de carga da correia também desempenha um papel importante na estabilidade operacional de um transportador tubular. Materiais umedecidos ou contendo produtos químicos, materiais quentes, finos ou grumos, fertilizantes, óleos vegetais e minerais ou gorduras animais podem causar o envelhecimento acelerado de uma correia tubular, com aumento da dureza na cobertura de carga [6,116]. O efeito a longo prazo consiste na diminuição da força de abertura da correia, o que leva à rotação e a problemas de alinhamento. Projetistas e engenheiros devem considerar a seleção adequada da cobertura de carga da correia e a medição regular de dureza. O valor de dureza de  $60 \pm 5$  Shore A é típico para a maioria das aplicações [6], para as quais 80 Shore A é um valor de alerta [117,118] e pode desencadear um plano de substituição da correia devido ao envelhecimento acelerado ou natural. Medidas proativas incluem o alinhamento regular da

correia tubular, a redução da tensão de esticamento com base em medições de dureza e inspeções visuais da cobertura de carga para detectar a propagação de trincas.

#### 2.4.1.9. Instabilidade no enchimento

O grau de enchimento da correia em um transportador tubular desempenha papel importante na alteração do seu momento rotacional. Essa condição afeta o segmento de carga da correia e sua operação a vazio é muitas vezes problemática devido ao deslocamento do centro de gravidade da formação tubular, o que causa problemas de alinhamento [6]. O carregamento instável da correia tubular pode resultar em regiões vazias ao longo de sua rota, gerando forças de contato desiguais na direção longitudinal e favorecendo a rotação da correia, uma vez que a geometria da seção transversal define a posição do centro de gravidade da correia tubular [7]. Por último, o enchimento excessivo também pode levar à rotação incontrolável da correia, com problemas decorrentes do aumento da tensão longitudinal, devido às forças de contato adicionais nos rolos do transportador (dado o maior diâmetro da formação tubular). Essa condição favorece a ocorrência de danos prematuros nos rolamentos dos rolos, cisalhamento dos parafusos de fixação dos rolos nos painéis, falhas de emenda, rasgos na correia, remoção dos suportes de sustentação dos rolos ou até mesmo rompimento da correia. A Figura 8 (a–c) ilustra exemplos de problemas decorrentes do enchimento excessivo em correias transportadoras tubulares.



a



b



c

Figura 8. Enchimento excessivo em correias transportadoras tubulares. (a) Compressão do granel sólido no segmento de carga; (b) cisalhamento dos parafusos de sustentação do rolo na posição superior de um painel; (c) sobrecarga da correia na região de carregamento [5].

Nesse sentido, o controle adequado do carregamento a montante da correia tubular, usualmente combinando um sistema de pesagem dinâmica, um inversor de frequência variável (em inglês: *Variable-frequency drive – VFD*) e a adoção de dispositivos de proteção para detecção de transbordo de material na região de carregamento, deve ser considerado nas fases iniciais de projeto. No caso de granéis com tamanho de partículas irregulares ou de limitações quanto ao controle do grau de enchimento na região de carregamento, recomenda-se que o grau máximo de enchimento admissível seja reduzido, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Recomendações de grau de enchimento para correias transportadoras tubulares [5].

Recomendação	Critério	Grau de enchimento
Manual CEMA 7ª Edição [6]	Sem partículas irregulares e bom controle do grau de enchimento na região de carregamento	80% - 85%
	Valor típico	75%
	Partículas muito irregulares ou limitado controle do grau de enchimento na região de carregamento	60% ou menor
JB/T 10380:2013 [119]	Tamanho das partículas é menor que 1/3 do diâmetro nominal da formação tubular	75%
	Tamanho das partículas é menor que 1/2 do diâmetro nominal da formação tubular	50% - 60%
	Tamanho das partículas é menor que 2/3 do diâmetro nominal da formação tubular	40% - 50%
VDI 4438:2019 [120]	Tamanho das partículas é menor que 1/3 do diâmetro nominal da formação tubular	80%
	Sem partículas irregulares e bom controle do grau de enchimento na região de carregamento	
	Tamanho das partículas é menor que 1/3 do diâmetro nominal da formação tubular	60% - 80%
	Valor típico	30%
Tamanho das partículas é menor que 1/3 do diâmetro nominal da formação tubular		
	Partículas muito irregulares ou limitado controle do grau de enchimento na região de carregamento	

Recomenda-se um plano de detecção de falhas para testar os painéis de segurança, as chaves de desalinhamento e os sensores de enchimento excessivo nas estações de carregamento. O comprimento da região protegida pelos painéis de segurança deverá permitir a parada completa da correia após a detecção da condição de enchimento excessivo, sob risco de não conseguir evitar suas consequências. Medidas proativas também incluem o uso de um método de partida suave para reconexão após um evento de enchimento excessivo e a operação do transportador com seu grau de enchimento constante [121].

#### 2.4.1.10. Rota do transportador inadequada

A rota é o parâmetro estrutural mais importante para alcançar a estabilidade operacional em transportadores tubulares. A definição inadequada dos raios de curvatura pode levar à rotação

recorrente da correia, resultando na substituição prematura ao longo de todo o ciclo de vida de um transportador [6]. As curvas da rota impõem tensões adicionais à cobertura de retorno da correia, resultando em tensões máximas nos pontos médios dos arcos. O alongamento e a compressão máximos da correia ocorrem, respectivamente, nas regiões externa e interna de cada curva [28,119]. Além disso, a redução da seção transversal da correia em segmentos curvos resulta em um notável aumento das tensões na região de sobreposição [122]. Isso pode fazer com que uma ou mais forças de contato se tornem iguais a zero, favorecendo, assim, o derramamento de material e a rotação da correia [12,92,123]. O alongamento e a compressão excessivos em segmentos curvos também podem, respectivamente, levar a tensões excessivas localizadas e à deformação da correia, afetando sua vida útil.

Um fator-chave na determinação da rota é o menor raio admissível para as curvas horizontais e verticais, que depende da estrutura do transportador, do diâmetro da formação tubular, do ângulo de deflexão da curva, do comprimento do segmento curvo e da tensão longitudinal na correia [119]. As recomendações padronizadas da CEMA para raios mínimos de curvatura consideram as seguintes variáveis de projeto: tipo de reforço da correia tubular, diâmetro nominal da formação tubular e ângulo central da curva, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2. Recomendações de raios mínimos de curvatura para correias transportadoras tubulares [5].

Variável	Critério	Coefficiente	Valor
Tipo de reforço da correia tubular	Náilon	<i>p</i>	0
	Poliéster-náilon		1
	Aramida		2
	Cabos de aço		4
Diâmetro nominal da formação tubular (mm)	entre 150 e 300	<i>f</i>	0
	entre 300 e 500		1
Ângulo central da curva (°)	< 25°	<i>c</i>	0
	entre 25° e 50°		1
	entre 50° e 75°		2
	entre 75° e 100°		3
Raio mínimo de curvatura (mm)	$[300 + 100 \times (p + f + c)] \times \text{Diâmetro nominal do tubo (mm)}$		

Medidas proativas podem incluir a adoção de raios de curvatura horizontais mais conservadores (quanto maiores, melhor), evitar a alternância desnecessária da direção horizontal, limitar a inclinação vertical a 30° e simular as forças de contato em segmentos curvos para garantir que nenhuma força de contato seja igual a zero, embora essa seja uma condição comumente observada em aplicações práticas [119]. Também é recomendado que a tensão de esticamento da correia seja reduzida com base em medições periódicas do diâmetro da correia, realizadas em pontos da rota predefinidos ao longo de seu ciclo de vida.

#### 2.4.1.11. Velocidade de operação elevada

A elevação da velocidade de operação em transportadores tubulares pode provocar a rotação da correia devido ao aumento da resistência ao rolamento por indentação e ao efeito de agrupamento do material. O primeiro é causado pelo comportamento viscoelástico da cobertura de retorno da correia em contato com a carcaça dos rolos do transportador: A

elevação na velocidade ocasiona um aumento da assimetria na zona de contato e uma consequente elevação na força horizontal opositora ao movimento da correia [31,91], o que pode aumentar o momento rotacional da correia no caso de forças de contato desiguais; isso ocorre principalmente nos segmentos curvos do transportador.

Quanto ao efeito do agrupamento de material, trata-se de uma reação ressonante entre as frequências de ondas transversais da correia e as frequências de excitação dos rolos do transportador [124-126], criando zonas alternadas de graus de enchimento aumentados e reduzidos ao longo do segmento de carga da correia, alterando as forças de contato na direção longitudinal. Além disso, na velocidade crítica da correia, podem surgir regimes em que as amplitudes dos desvios angulares se tornam significativas mesmo na ausência de influências externas. O pior caso, em termos de ocorrência de vibrações angulares significativas, é a operação a vazio do transportador tubular sob uma tensão longitudinal mínima [127].

A velocidade da correia é abordada de forma diferente conforme as normas ou recomendações adotadas. De acordo com o sétimo manual da CEMA, a velocidade escalar de uma correia é limitada pela máxima velocidade angular admissível nos rolos do transportador, bem como pelo efeito do comportamento dinâmico do material nas zonas de transição [6]. As normas alemã VDI 4438:2019 (em versão preliminar) e chinesa JB/T 10380:2013 recomendam velocidades máximas da correia de 6,0 m/s e 7,1 m/s, respectivamente [119,120].

Medidas proativas podem incluir a adoção de uma velocidade mais conservadora da correia (inferior a 5 m/s, quando prático) e a avaliação das frequências de ondas transversais da correia nas fases iniciais de projeto. Também se recomenda manter uma margem de segurança na velocidade operacional dos rolos do transportador. Dependendo dos critérios de projeto adotados para os rolos, a velocidade máxima pode variar de 600 rpm (CEMA) [6] a 750 rpm (DIN) [128]. A margem de segurança pode permitir que o usuário final solucione

problemas de agrupamento de material alterando a velocidade da correia (o que pode exigir o aumento da potência do acionamento), minimizando o efeito do desbalanceamento dos rolos (devido à excentricidade intrínseca ou problemas de qualidade no processo de fabricação) ou deslocando as frequências de ondas transversais da correia dos modos ressonantes (que correspondem às frequências de rotação dos rolos do transportador em  $\frac{1}{2}$ , 1, 2, 3... vezes as frequências da correia).

#### 2.4.1.12. Flecha da correia entre painéis

A flecha da correia entre painéis desempenha um papel importante na estabilidade operacional de um transportador tubular. Usando um equipamento experimental de teste dinâmico, GUO *et al.* [18] identificaram uma relação direta entre a flecha da correia e as forças de contato no segmento reto de um transportador tubular. A flecha excessiva pode causar derramamento de material devido à abertura das bordas da correia entre os painéis. Também pode causar o aumento do diâmetro da formação tubular e a maior deformação da borracha na superfície dos rolos do transportador, levando à rotação incontrolável da correia devido ao aumento da sua tensão longitudinal e às forças de contato concentradas nos painéis do transportador [11].

Medidas proativas podem incluir a adoção de um espaçamento mais conservador entre painéis nos segmentos retos do transportador, bem como a redução do espaço nos segmentos curvos para mitigar os efeitos da flecha entre painéis. Nesse contexto, a avaliação e o balanceamento adequados do consumo de energia são importantes para a estabilidade operacional, uma vez que a redução do espaçamento entre painéis resulta em perdas aumentadas devido à resistência ao rolamento por indentação [31,91,129,130].

Os valores típicos de espaçamento entre painéis variam de 1,45 m a 2,36 m com base no peso específico do material manuseado e no diâmetro nominal da formação tubular [6,131]; entretanto, fatores adicionais podem ser considerados, como a rota do transportador, a

flexibilidade transversal da correia, a tensão de esticamento da correia, o número de curvas do transportador e seus raios correspondentes. Espaçamentos aleatórios ou alternados também podem ser utilizados para minimizar as respostas ressonantes da correia.

Durante a fase de comissionamento, espera-se um aumento da flecha da correia durante o período de acomodação (acamamento), o que requer um número inicial de ciclos para a estabilização. Com base nisso, recomenda-se obter do fabricante o valor da força de abertura da correia em função do número de ciclos, o que permitirá uma estimativa adequada do período de acomodação. Isso pode afetar o alinhamento inicial da correia e as medidas preventivas podem incluir um aumento temporário da tensão de esticamento.

O comissionamento de um transportador tubular requer um tempo significativamente maior para atingir a operação estável pretendida do que o necessário para um transportador de correia aberta convencional [119]. Normalmente, é necessária potência de acionamento adicional durante esse período, mesmo ao operar um transportador a vazio [122], e essa condição é especialmente relevante para transportadores tubulares de longa distância ou de rota complexa. Portanto, recomenda-se que essa capacidade sobressalente seja antecipada, incluindo a operação em velocidade de inspeção. As indisponibilidades de potência motriz sobressalente e/ou de velocidade de inspeção durante o acionamento podem atrasar os planos de comissionamento de um transportador tubular. Tais fatores podem desencadear um cenário operacional altamente desfavorável logo após a entrega do projeto, caracterizado por uma falha de acionamento do transportador carregado após um desligamento intempestivo da motorização.

#### 2.4.1.13. Elevado número de ciclos de abertura e fechamento

O número de ciclos de abertura e fechamento desempenha um papel essencial na mudança das forças de contato ao longo do tempo em uma correia tubular. A dobra da correia ocorre pelo menos duas vezes a cada volta completa, nas zonas de transição dos segmentos de

carga e de retorno do transportador. Em circunstâncias normais de operação, a rigidez transversal da correia diminui gradualmente devido à fadiga cíclica [132], desencadeada pelo movimento repetitivo de flexão da correia ao longo do seu ciclo de vida [91]. Essa condição afeta principalmente transportadores tubulares de curta distância e pode resultar na adoção de correias mais rígidas ou em uma taxa de substituição mais elevada, o que influencia negativamente o custo total de propriedade do equipamento. Nesses casos, recomenda-se reduzir sistematicamente a tensão de esticamento da correia, com base em medições periódicas do diâmetro da correia em pontos da rota predefinidos ao longo de seu ciclo de vida.

#### 2.4.1.14. Reforço da correia inadequado

A seleção e o arranjo adequados dos reforços de uma correia tubular são fundamentais para reduzir a tendência à rotação e assegurar a operação estável do transportador ao longo de seu ciclo de vida [119]. Usualmente, uma correia tubular apresenta propriedades distintas em sua seção transversal, com variações discretas na rigidez transversal, no alongamento e na massa linear, para as quais a parte central é frequentemente de valor aumentado [12,133]. Isso neutraliza o momento rotacional da correia, mantendo o centro de gravidade abaixo da linha central, especialmente em operação a vazio.

As seguintes técnicas são comumente aplicadas na construção de correias tubulares: (i) aplicação de reforços nas camadas horizontais da largura da correia, (ii) distribuição assimétrica de reforços na carcaça da correia, ou (iii) variação da rigidez transversal nas diferentes zonas da largura da correia [12]. As correias utilizadas em transportadores tubulares podem ser reforçadas em náilon-náilon (P), poliéster-náilon (EP), aramida (D), aramida-náilon (DP) e cabos de aço (ST) [6], para as quais a seleção baseia-se em vários fatores, incluindo o alongamento da correia, a tensão longitudinal, os diâmetros dos tambores, a massa linear da correia, o comprimento da zona de transição e a rota do transportador. Cabe notar que esses fatores são influenciados pelo raio de curvatura e pelas tensões

admissíveis nos segmentos curvos. A Figura 9 (a–c) apresenta exemplos dos diferentes reforços utilizados em correias tubulares.

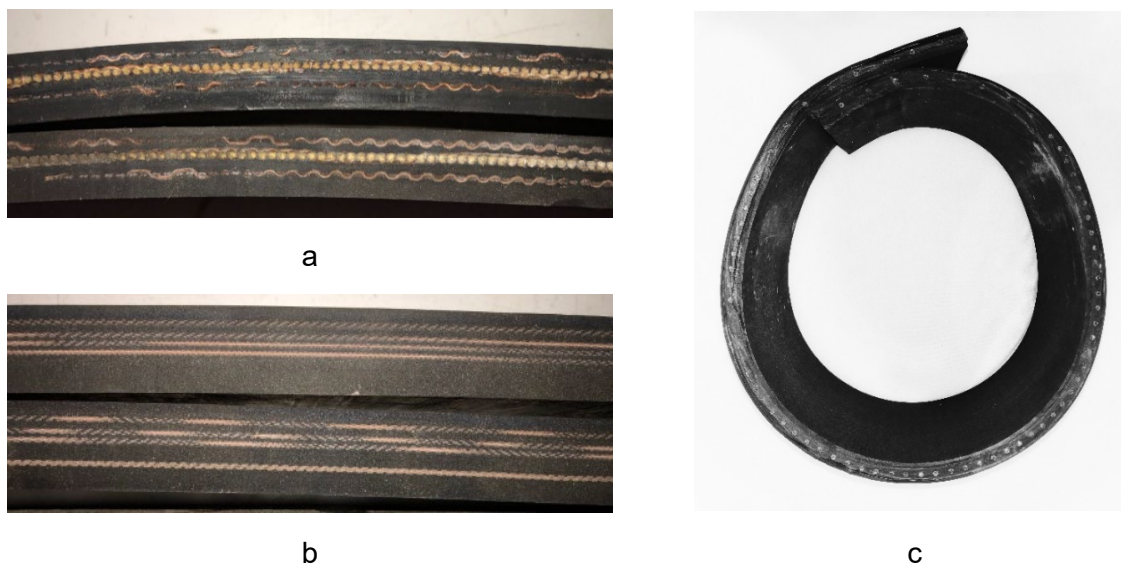


Figura 9. Exemplos de reforços utilizados em correias tubulares: (a) aramida; (b) lonas têxteis; (c) cabos de aço [5].

Medidas proativas incluem o uso acoplado dos métodos dos elementos finitos (MEF) e dos elementos discretos (MED) para investigar o arranjo dos reforços propostos. ZHENG *et al.* [9] utilizaram uma abordagem numérica e determinaram que as forças de contato são altamente sensíveis em casos de funcionamento a vazio de um transportador tubular, com vários fatores sutis afetando a distribuição dessas forças, como o atrito da superfície da cobertura de retorno, a maior flexibilidade transversal nas bordas da correia, e a posição da sobreposição em relação aos painéis do transportador.

#### 2.4.1.15. Baixa razão entre a largura da correia e o diâmetro da formação tubular

O comprimento da sobreposição das bordas de uma correia tubular é comumente expresso como função da razão entre a largura da correia ( $B$ ) e o diâmetro da formação tubular ( $D$ ), representada pela relação  $B/D$ , e desempenha papel essencial para garantir a vedação adequada da formação tubular. A relação  $B/D$  varia de 3,5 a 4 na maioria das aplicações [6] [7,119,120,134]; entretanto, faz-se necessário considerar as características do projeto, a

forma construtiva da correia, as normas adotadas no projeto e a experiência prévia de engenheiros especialistas nessa tecnologia. De acordo com GUO *et al.* [135], a força lateral de uma correia tubular está correlacionada com o tamanho de partícula do sólido a granel, o espaçamento entre painéis, o grau de enchimento e outros parâmetros.

Utilizando um dispositivo de teste, composto por seis pontos de contato, para mensurar a rigidez de correias tubulares, ZAMIRALOVA e LODEWIJKS [7] concluíram que correias mais flexíveis requerem uma relação B/D mais elevada para formar um tubo estável. Os autores também exploraram o aumento do diâmetro da formação tubular com as mesmas amostras de correia, o que resultou em uma diminuição das forças de contato devido à redução da força de abertura. Portanto, a adoção de uma relação B/D mais elevada resulta no aumento das forças de contato, neutralizando, assim, o momento rotacional da correia. A Figura 10 (a–d) ilustra a sobreposição da correia em diferentes comprimentos para um diâmetro nominal fixo.



Figura 10. Relação B/D em diferentes comprimentos de sobreposição para diâmetro nominal de 375 mm. (a) relação B/D igual a 3,6; (b) relação B/D igual a 3,8; (c) relação B/D igual a 4,0; (d) relação B/D igual a 4,2 [5].

Medidas proativas podem incluir a adoção de uma relação B/D mais conservadora na seleção de correias nas fases de projeto; quanto mais próxima do valor 4, maiores serão as forças de contato. Entretanto, as recomendações referentes à flecha entre painéis e ao reforço inadequado da correia devem ser consideradas. A adoção de relações B/D mais elevadas também requer cautela na seleção adequada do arranjo dos rolos nos painéis do transportador: (i) painéis com rolos em linha podem favorecer o pinçamento da correia entre

rolos adjacentes durante uma mudança na posição de sobreposição, mesmo que esta ocorra dentro de uma faixa esperada; (ii) painéis com rolos alternados podem favorecer o atrito da correia com suas faces laterais caso as bordas da correia sejam muito flexíveis, o que exige a adoção de rolos mais longos nos painéis do transportador (com consequente aumento dos custos e cargas da estrutura).

#### 2.4.1.16. Baixa rigidez transversal

A rigidez transversal da correia é tão relevante quanto a rota para que um transportador tubular alcance estabilidade operacional [14]. Uma maior rigidez da correia resulta em maiores forças de contato, maior resistência à rotação e menor probabilidade de colapso nos segmentos curvos do transportador [15,34,121,136]. Porém, valores elevados de rigidez transversal podem levar à abertura das bordas da correia entre os painéis do transportador [12], aumentando a tensão longitudinal e o consumo geral de energia do equipamento [15].

Correias de maior massa linear requerem valores maiores de rigidez transversal para a estabilidade da formação tubular [8] e, para um mesmo módulo de elasticidade, correias de maior espessura e menor largura apresentam valores de rigidez mais elevados do que correias de menor espessura e maior largura [137]. Durante as operações, as propriedades da correia mudam devido ao envelhecimento natural da borracha, à interação entre a correia e o sólido a granel, à propagação de trincas nas coberturas da correia e à fadiga da correia devido aos ciclos repetitivos de abertura e fechamento [138,139].

Para determinar o equilíbrio adequado desse parâmetro, recomenda-se a aplicação de métodos de teste, conforme a norma ISO 703:2017 *Conveyor belts – Transverse flexibility (troughability) – Test method* [103], em amostras da correia nos estágios iniciais do projeto, bem como a utilização de modelos acoplados de análise por MEF e MED. Para otimização do consumo de energia e especificações de potência adequadas, projetistas e engenheiros devem considerar a medição da resistência ao rolamento por indentação em amostras da

correia aplicando os seguintes métodos: (i) *DIN EN 16974:2016 Conveyor belts – Indentation rolling resistance related to belt width – Requirements, testing* (em português: Correias transportadoras – Resistência ao rolamento por indentação relacionada à largura da correia – Requisitos, testes), ou (ii) *AS 1334.13:2017 Methods of testing conveyor and elevator belting – Determination of indentation rolling resistance of conveyor belting* (em português: Métodos de teste de correias transportadoras e elevadoras – Determinação da resistência ao rolamento por indentação de correias transportadoras) [91,140,141].

#### 2.4.1.17. Desalinhamento dos painéis em relação à linha central do transportador

O desalinhamento estrutural contribui para a rotação da correia em um transportador tubular, o que está associado não apenas à fase de construção e montagem do equipamento, mas também a procedimentos de manutenção inadequados ao longo de sua vida útil. A maior parte do comprimento de um transportador tubular é composta por painéis hexagonais para o confinamento da correia [20]; portanto, o alinhamento adequado desses painéis é um parâmetro fundamental para a estabilidade operacional do transportador [119].

O desalinhamento dos painéis em relação à linha central do transportador pode gerar forças de contato desiguais, resultando em um momento rotacional. Nos casos em que uma ou mais forças de contato se tornam iguais a zero, é provável que seja desencadeada a rotação da correia [12,92]. Além disso, o desalinhamento no plano transversal de um painel (deslocamento radial em relação à linha central do transportador) afetará o alinhamento da correia, pois o contato com os rolos dos painéis será indevidamente inclinado, o que pode provocar rotação da correia.

Boas práticas para garantir o alinhamento adequado podem incluir as seguintes abordagens:

(i) numerar todos os painéis hexagonais e mapear cada ponto central para alinhamento longitudinal; (ii) aplicar 1/1000 do comprimento da seção como desvio máximo para traçar a linha central do transportador [120], que normalmente utiliza o espaçamento entre painéis

como comprimento mínimo; (iii) mapear o plano transversal de cada painel e zerar o deslocamento radial em relação à linha central do transportador, para o qual o raio de curvatura da seção deve ser cuidadosamente considerado; e (iv) documentar o posicionamento durante as etapas de construção e comissionamento para futuras manutenções.

#### 2.4.1.18. Variação de dureza ao longo do comprimento da correia

Variações nas propriedades de uma correia tubular ao longo de seu comprimento influenciam seu momento rotacional, afetando, assim, o desempenho de um transportador tubular. Mudanças na rigidez transversal da correia ao longo de seu comprimento muitas vezes causam rotação dentro de uma faixa observável, mesmo na ausência de forças externas, por exemplo, durante a operação a vazio do transportador. Essa rotação é chamada de desalinhamento fantasma em aplicações de campo.

Estas variações podem ser causadas (i) por problemas de qualidade no processo de fabricação dentro de um mesmo lote, por exemplo, quando uma seção de correia de baixa qualidade é vulcanizada em seções saudáveis (normalmente, essas seções variam de 500 m a 700 m de comprimento), ou (ii) pelo envelhecimento acelerado de seções específicas da correia, por exemplo, quando uma seção de correia sobressalente armazenada por um longo período é vulcanizada em seções originais da correia que não foram armazenadas antes da instalação, o que configura um cenário típico de manutenção para sistemas de manuseio.

Uma das principais causas dessa alteração na rigidez da correia é a variação de sua dureza, que depende da temperatura e do tempo [142], ambos associados aos processos de vulcanização. Alterações associadas à temperatura podem ser desencadeadas por sub ou superaquecimento da correia durante o processo de vulcanização, enquanto as alterações associadas ao tempo podem se manifestar por meio da perda de flexibilidade transversal da correia [91] devido ao armazenamento por um longo período em uma posição plana (ou

simplesmente por causa da diferença no tempo de acomodação entre as seções de correia armazenadas e instaladas).

Medidas proativas podem incluir o devido diligenciamento para todos os processos de fabricação relacionados à correia, seguindo rigorosamente as normas e padrões relacionados às especificações técnicas do projeto e garantindo condições de armazenamento adequadas para a correia de acordo com a norma ISO 5285:2012 *Conveyor belts – Guidelines for storage and handling* (em português: Correias transportadoras – Diretrizes para armazenamento e manuseio) [97, 143]. A emenda de correias tubulares com propriedades distintas é fortemente desencorajada, e o monitoramento periódico da dureza da correia em diferentes seções ao longo de seu comprimento é recomendado para apoiar os processos de tomada de decisão de manutenção.

#### 2.4.1.19. Problemas durante a vulcanização de emendas

Problemas nas emendas da correia também podem resultar no desalinhamento fantasma em um transportador tubular, desencadeado por (i) maior dureza na região da emenda, decorrente da vulcanização, ou por (ii) problemas de esquadrejamento ou de alinhamento da emenda durante sua preparação. Devido à elevada flexibilidade transversal e aos requisitos de tensão longitudinal de uma correia tubular, a vulcanização a quente é o método de emenda aplicável. As correias de cabo de aço empregam emendas padrão (emendas de topo), enquanto as correias têxteis de lonas e as reforçadas em aramida empregam emendas em dedo (em inglês: *finger splices*) em vez de emendas de lona padrão [6] (emenda de sobreposição para os casos de lona única ou emenda em degraus para os casos de lonas múltiplas), conforme mostrado na Figura 11 (a–l).

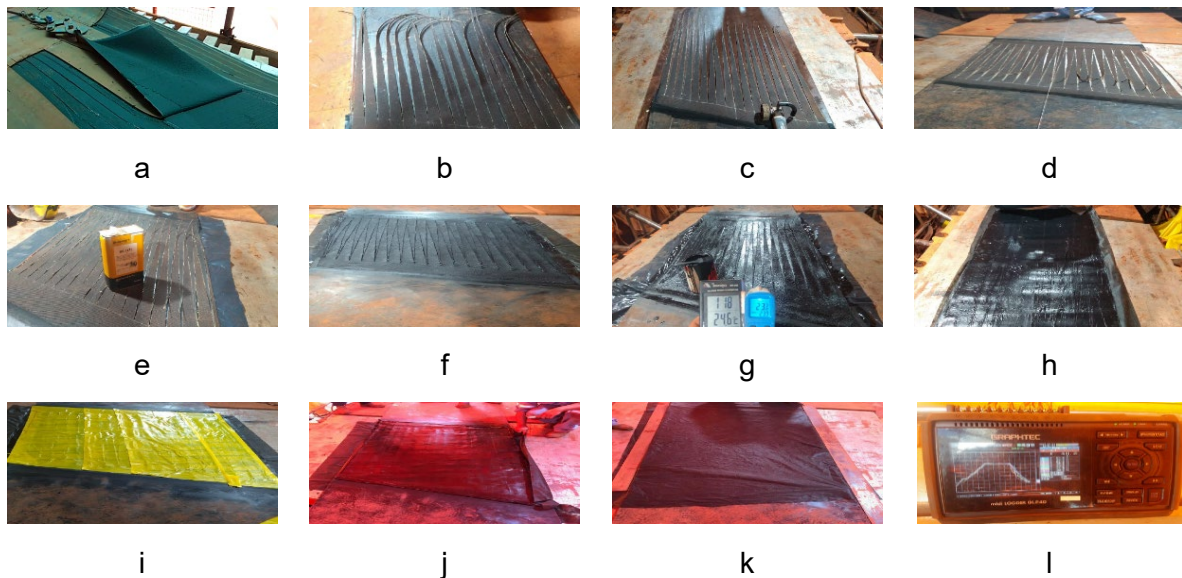


Figura 11. Emenda em dedo aplicada a uma correia tubular: (a) remoção da cobertura; (b) corte e preparo das tiras em dedos; (c) encaixe das tiras em dedos; (d) esquadrejamento e alinhamento da emenda; (e) aplicação de solvente; (f) montagem da zona de transição da emenda; (g) aplicação de cola cimento; (h) montagem da borracha de cobertura inferior; (i) aplicação de borracha de ligação; (j) montagem da borracha de cobertura superior; (k) conformação das bordas da correia; (l) monitoramento de pressão e temperatura de vulcanização [5].

A vulcanização de uma correia tubular é um processo de fabricação sensível, afetado por diversos fatores. Entre os mais relevantes, destacam-se a temperatura, o tempo e a pressão de vulcanização, a contaminação por umidade, o aprisionamento de ar, além da aplicação de consumíveis fora da validade ou inadequados à aplicação [144]. A vulcanização inadequada de uma emenda resulta em uma borracha porosa, que apresenta envelhecimento acelerado, aumento de dureza e redução da flexibilidade transversal [145].

Medidas proativas podem incluir o monitoramento rigoroso dos parâmetros de vulcanização especificados para a correia selecionada, considerando suas propriedades e as coberturas de carga e de retorno. Informações documentadas sobre as emendas vulcanizadas devem ser retidas, detalhando os números de lote e a validade dos materiais empregados, bem como

a temperatura, a pressão, o ciclo de aquecimento, o ciclo de cura, as dimensões da emenda (diagonais, comprimento, largura e espessura) e a dureza da correia na região da emenda e nas adjacências antes e após o processo. Medidas preventivas incluem a substituição de emendas de baixa qualidade e a aplicação das recomendações relativas à variação de dureza ao longo do comprimento da correia.

#### 2.4.1.20. Tensão longitudinal excessiva durante a instalação

A instalação da correia é uma atividade crítica em transportadores tubulares por diversos motivos. Essa é uma atividade de alto custo e de longa duração, com riscos de segurança significativos tanto para a equipe envolvida quanto para a própria correia. Assim, a rotação da correia pode ocorrer durante esse processo devido à elevada força de abertura inicial, aliada à aplicação de uma tensão longitudinal excessiva. Danos à correia nessa fase podem atrasar ou mesmo encerrar os procedimentos de instalação, resultando em graves consequências operacionais para o proprietário ou custodiante do ativo. A flexão excessiva da correia, tanto transversalmente (devido ao posicionamento inadequado das dobras sobrepostas na etapa de preparação) quanto longitudinalmente (devido ao colapso da formação tubular ou à tensão longitudinal excessiva durante a passagem da correia), pode levar a problemas recorrentes nas fases de comissionamento, de testes iniciais e de operação.

A passagem da correia em transportadores tubulares de longa distância exige a operação simultânea do sistema de acionamento da correia em velocidade reduzida e de uma fonte externa de tração, para a qual um enrolador de correias motorizado é o equipamento recomendado [122,146,147]. Contudo, restrições técnicas ou de recursos podem levar ao uso de escavadeiras, pás carregadeiras ou tratores de esteira para essa finalidade, sem o emprego de controle da força de tração.

As etapas de instalação ou substituição de uma correia tubular incluem a análise do terreno e da rota para determinar o local da pré-emenda, onde a correia é posicionada em dobras

sobrepostas após uma sequência de emendas. O próximo passo envolve conectar a nova correia a um cabo de aço (usando um dispositivo em forma de torpedo na instalação inicial ou após uma ruptura da correia [122]) ou à correia existente (usando uma emenda temporária nos casos em que não houve rompimento). O cabo de aço (ou a correia existente) é então puxado(a) para fora da estrutura do transportador e a nova correia é confinada em formação tubular pela primeira vez [146,147]. A Figura 12 (a–b) apresenta exemplos de dispositivos de conexão para instalação ou substituição de correias tubulares.



Figura 12. Tração de uma correia tubular durante a instalação: (a) dispositivo em forma de torpedo para instalação; (b) remoção de uma correia avariada após rompimento [5].

Medidas proativas podem incluir o uso de um dinamômetro ou o controle de torque no dispositivo de tração externo, combinado à adoção da velocidade de operação mínima viável da correia, influenciada, técnica e operacionalmente, pelo controle de torque da motorização do transportador, bem como pelo tempo mínimo de passagem pretendido, respectivamente. Uma equipe experiente deve ser posicionada ao longo da rota do transportador para monitorar a posição de sobreposição e coordenar a passagem da correia utilizando uma abordagem eficaz de comunicação em três vias. Se necessário, recomenda-se interromper a passagem da correia, liberando a tensão longitudinal, para o reposicionamento manual das seções rotacionadas, principalmente se estiverem próximas de 360°. Os projetistas e engenheiros devem considerar, nos estágios iniciais do projeto, a tração necessária para a instalação

adequada da correia como um dos critérios para o fornecimento de um acionamento que permita velocidade reduzida ou de inspeção. A Figura 13 (a–e) ilustra algumas etapas do processo de instalação de uma correia tubular.



Figura 13. Instalação de uma correia tubular: (a) posicionamento da correia; (b) enrolador de correia; (c) correia posicionada em dobras sobrepostas após sequência de emendas; (d) bobina com a correia a ser instalada; (e) tração da correia utilizando cabo de aço conectado a uma pá carregadeira [5].

#### 2.4.1.21. Tensão de esticamento incorreta

A tensão de esticamento incorreta em uma correia transportadora tubular pode provocar rotações além dos limites toleráveis. Quando a tensão de esticamento na aplicação é reduzida, aumentam as forças de contato entre a correia e os rolos, resultantes da rigidez transversal da correia dobrada [148] e das pressões ativas e passivas exercidas pelo material manuseado e pela correia na passagem pelos painéis [129,149]. Isso pode resultar no aumento do diâmetro da formação tubular e na maior deformação da borracha na superfície

dos rolos do transportador [11], bem como no derramamento de material e na emissão de particulado pelo espaçamento adicional entre as bordas da correia entre painéis [8].

Em aplicações práticas, uma tensão de esticamento excessivamente baixa em uma correia provoca oscilações na corrente elétrica de acionamento, frequentemente observadas após a substituição de uma correia existente, quando a tensão de esticamento é insuficiente para a aplicação. Por outro lado, um aumento na tensão de esticamento da correia leva à redução das forças de contato nos segmentos fechados [148], e tensões longitudinais elevadas na correia exigem maior rigidez transversal para evitar colapsos nos segmentos curvos [121]. Ambas as condições podem provocar rotação da correia.

Ao contrário das observações em segmentos fechados de um transportador tubular, observa-se um efeito diferente nas zonas de transição, com uma relação direta entre a tensão de esticamento da correia e as forças de contato. Constata-se também um aumento da assimetria das forças de contato nessa região [25]. Esse comportamento é atribuído ao processo altamente não linear de dobra da correia, combinado com diferenças na geometria das zonas de transição (necessárias para alinhar as formas aberta e tubular da correia). Esse efeito é explorado em estudos relevantes utilizando um aparato estático de teste que reproduz a zona de transição em um transportador tubular, desenvolvido na Universidade Técnica de Košice [10,11,19-26,150].

Os transientes de partida e de parada também podem levar à rotação da correia devido a uma tensão de esticamento incorreta. Um tempo de partida reduzido resulta em maior tensão longitudinal na correia e, conseqüentemente, em redução das forças de contato. O uso de inversores de frequência (VFD) ou de chaves de partida suave, combinado à adoção de um tempo de aceleração mais conservador, contribui para transientes mais suaves. Entretanto, paradas seguras, falhas intempestivas ou desarmes da motorização do transportador resultam em baixa tensão longitudinal na correia com um rápido aumento das forças de contato. Nesse caso, recomenda-se o uso de volantes de inércia nos tambores motriz ou de

freios do tipo Capstan para a recuperação da tensão de esticamento [151-153]. Em ambos os casos, a sincronização entre os transportadores a montante e a jusante é relevante para evitar o transbordo de material e a obstrução dos chutes de transferência.

Boas práticas podem incluir o planejamento de uma faixa com valores mínimo e máximo de tensão de esticamento da correia como um parâmetro de projeto, limitando o valor mínimo de acordo com o atrito necessário nos tambores motrizes e a potência instalada, e limitando o valor máximo de acordo com a tensão longitudinal admissível da correia e as forças de contato mínimas requeridas entre a correia tubular e os rolos do transportador. Também é recomendável ajustar a tensão de esticamento com base em medições do diâmetro da correia em estágios predefinidos ao longo de seu ciclo de vida. As fases de comissionamento e de final de vida útil provavelmente exigirão, respectivamente, o aumento e a redução da tensão de esticamento, como parte de uma abordagem de gestão de ativos para manter a estabilidade operacional necessária.

#### 2.4.1.22. Desalinhamento dos rolos

O alinhamento da correia é uma tarefa essencial ao longo de todo o ciclo de vida de um transportador tubular, visando prevenir e corrigir rotações. Uma das abordagens típicas para o alinhamento da correia tubular é a adoção de métodos passivos, em que os rolos dos painéis fechados são ligeiramente angulados horizontalmente para neutralizar o momento rotacional da correia (normalmente, o rolo inferior é utilizado para essa finalidade, o que favorece a repetibilidade do método). Métodos ativos também foram testados por meio de soluções patenteadas, nas quais um instrumento é utilizado para monitorar a posição de sobreposição e um atuador move o rolo inferior no painel fechado para alinhamento (uma aplicação menos comum considera o movimento completo do painel para esta finalidade) [154,155].

Independentemente da abordagem escolhida, o alinhamento da correia é uma tarefa complexa, frequentemente necessária e de longa duração; portanto, não deve ser

negligenciado devido ao risco de consequências operacionais graves. Ao longo do ciclo de vida da correia, as forças de contato diminuem e os rolos mal alinhados ocultam possíveis gatilhos de falha que geram forças de rotação indesejáveis. Essa condição pode afetar até mesmo o segmento de retorno da correia, conforme mostrado na Figura 14 (a–c), na qual a tendência de rotação é reduzida devido ao posicionamento da sobreposição na região inferior da formação tubular [6] [7]. As forças de contato no segmento de retorno também são afetadas por uma redução de diâmetro, não completamente compreendida, possivelmente causada pela massa concentrada da correia na região de sobreposição [6] e pelo deslizamento da borda interna em relação à externa. Isso pode levar a uma diminuição nas forças de contato da correia com os rolos superiores e a uma maior contribuição dos rolos inferiores para o alinhamento da correia.

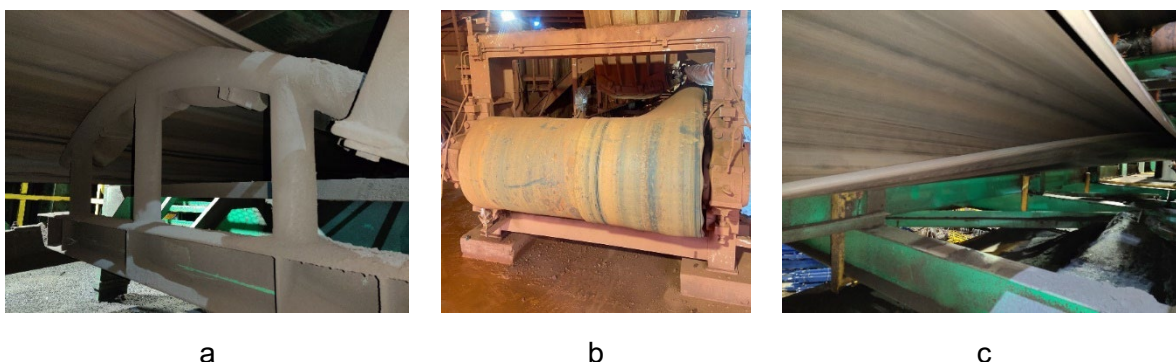


Figura 14. Problemas de alinhamento da correia no segmento de retorno em transportadores tubulares: (a) desalinhamento da correia plana; (b) colapso da correia no tambor de retorno; (c) dobra das bordas da correia na zona de transição [5].

Boas práticas podem incluir a completação mecânica adequada dos painéis fechados com confirmação documentada de inclinação zero dos rolos de alinhamento antes do comissionamento a quente do transportador. Recomenda-se numerar todos os suportes, incluindo a configuração final do alinhamento dos rolos, na documentação de entrega do projeto. As inspeções regulares e o controle adequado das mudanças contribuem para a estabilidade operacional e para a gestão do aprendizado. Além disso, a adoção de um arranjo

hexagonal, que resulte em uma formação tubular de menor diâmetro no segmento de retorno, pode ser cuidadosamente avaliada na fase de projeto, com base nas especificações da correia.

#### 2.4.1.23. Baixa tensão nos rolos de moldagem

As zonas de transição de um transportador tubular impõem a maior pressão localizada na correia, o que afeta sua durabilidade e estabilidade operacional ao longo de seu ciclo de vida [23,156]. O comprimento da zona de transição normalmente varia entre 25 e 60 vezes o diâmetro nominal da formação tubular, com base na seleção do reforço da correia. Os rolos de moldagem guiam a correia do trecho plano até a formação tubular completa na zona de transição. São montados em sequência e com ajuste progressivo da tensão, definido por suas inclinações [131]. Esses rolos também são conhecidos como torpedos ou rolos tipo dedo (em inglês: *finger rolls*), por possuírem extremidades arredondadas e apenas um mancal, reforçado para suportar as elevadas forças de reação da correia.

A pesquisa sobre zonas de transição em transportadores tubulares é limitada [25], embora a formação de sobreposição seja fundamental para prevenir a rotação da correia tubular. Nesse sentido, dois processos essenciais ocorrem nas zonas de transição: (i) a definição da borda externa da sobreposição da correia e (ii) a acomodação das bordas da correia, governada pelo atrito na região de sobreposição. O primeiro processo é definido pelo ajuste adequado da diferença de elevação entre as bordas da correia (a borda externa deve manter-se mais elevada na zona de transição), evitando o contato entre as faces das bordas e a alternância dos lados sobrepostos, o que pode causar tensionamento severo da correia e rotação incontrolável. A Figura 15 (a–c) mostra a sobreposição alternada das bordas em uma correia tubular causada pela baixa tensão nos rolos de moldagem. O segundo processo é definido pela razão entre o comprimento da correia e o diâmetro da formação tubular (relação B/D), e os rolos de moldagem facilitam o posicionamento da borda interna até sua posição final no segmento fechado do transportador.



a

b

c

Figura 15. Alternância das bordas de sobreposição em uma correia tubular: (a) durante o processo de substituição; (b) após a perda de ajuste nos rolos de moldagem na zona de transição; (c) no segmento de retorno após a ocorrência de rotação severa da correia [5].

A tensão excessiva nos rolos de moldagem também representa risco à integridade da correia, acelerando o desgaste e a fadiga na região de sobreposição [23]. Portanto, é necessário cuidado na determinação do ponto de ajuste ideal. Nesse sentido, medidas proativas incluem o dimensionamento adequado de suportes e rolos de moldagem, proporcionando flexibilidade para ajuste de inclinações, mas evitando o afrouxamento dos parafusos estruturais e alterações nas posições ajustadas. Recomenda-se que sejam fornecidas informações documentadas sobre o comissionamento dos rolos de moldagem, além da inspeção regular de suas posições, da temperatura, dos níveis de ruído e das horas de utilização acumuladas. Boas práticas também incluem manter a mesma borda externa nos segmentos de carga e de retorno do transportador tubular, permitindo ao usuário final inverter a posição de sobreposição para prolongar o uso da correia durante sua fase de desgaste. Durante a fase de comissionamento, um aditivo deslizante (normalmente talco [122] ou grafite) pode ser dosado nas bordas da correia em operação para reduzir as forças de atrito no contato de sobreposição e compensar temporariamente os efeitos da força adicional de abertura da correia.

#### 2.4.1.24. Falta ou travamento de rolos do transportador

Rolos em falha alteram as forças de contato e a geometria da seção transversal da correia fechada em um transportador tubular. As falhas típicas em rolos incluem o desgaste da carcaça, travamento do rolamento e falhas na fixação do eixo, resultando em ejeção do painel ou travamento do rolo [89]. Essas falhas são difíceis de identificar quando se considera toda a extensão do transportador e podem afetar simultaneamente diferentes seções do segmento fechado [20]. MOLNAR *et al.* [157] estudaram o efeito da ausência de um rolo em um painel hexagonal de um transportador tubular e confirmaram a forte dependência das forças de contato com o rolo faltante. Além disso, rolos faltantes favorecem o aumento do diâmetro da formação tubular e a maior deformação da borracha no ponto de ocorrência, o que leva à rotação incontrolável da correia devido ao aumento da tensão longitudinal e às forças de contato concentradas nesses painéis [11]. Rolos travados, por sua vez, podem ocasionar forças de contato desiguais com a correia tubular, remoção abrupta desses rolos dos painéis [29] ou provocar problemas de alinhamento da correia.

O projeto adequado e a eficácia da estanqueidade são elementos-chave para garantir a confiabilidade dos rolos aplicados em transportadores tubulares. O posicionamento dos rolos em painéis hexagonais (portanto, a 60° para os rolos laterais) favorece a retenção de contaminantes e a entrada de águas pluviais. Nesse contexto, a vedação primária (um disco defletor externo) e a secundária (um retentor, tipicamente do tipo lábio de baixo atrito, para prevenir ou minimizar o ingresso de água e de particulados no labirinto do mancal) desempenham um papel essencial na proteção dos rolamentos contra desgaste prematuro. Condições de armazenamento (protegido da luz solar e de intempéries), rotinas adequadas de operação a vazio em caso de paradas prolongadas, bem como a adoção de procedimentos de asseguarção da qualidade nos processos de fabricação também maximizam a vida útil dos rolos [89].

Medidas proativas incluem o uso de rolos aprovados em testes de estanqueidade, de acordo com métodos padronizados, como os propostos na norma polonesa PN-M-46606:2010 [158], na sul-africana SANS 1313-3:2012 [159] e na alemã DIN 22112-3 :2022 [160]. Um plano estruturado de inspeção do transportador também é fortemente recomendado para mapear ou substituir rolos em falha ou faltantes, cobrindo toda a extensão do equipamento.

Dependendo da rota do transportador, do acesso às estruturas e das restrições de mão de obra para inspeção, a adoção de gêmeos digitais e de inspeções remotas pode apoiar o aumento da produtividade e a estabilidade operacional. FEDORKO *et al.* [47] propuseram um gêmeo digital para monitorar as forças de contato de um transportador tubular em caso de perda de rolos durante a operação. Enquanto isso, CARTER [161] listou avanços tecnológicos relacionados à inspeção de rolos como (i) a aplicação de veículos aéreos não tripulados (VANT) equipados com câmeras infravermelhas e RGB para voos de inspeção automatizados, conforme exemplificado na Figura 16 (a–c); (ii) o monitoramento das perturbações acústicas nos rolos, utilizando um cabo de fibra óptica ao longo da rota do transportador para identificar mudanças microscópicas em um feixe laser retroespalhado; e (iii) o uso de rolos inteligentes com alimentação autônoma interligados sem fio a um gerenciador central conectado à nuvem.

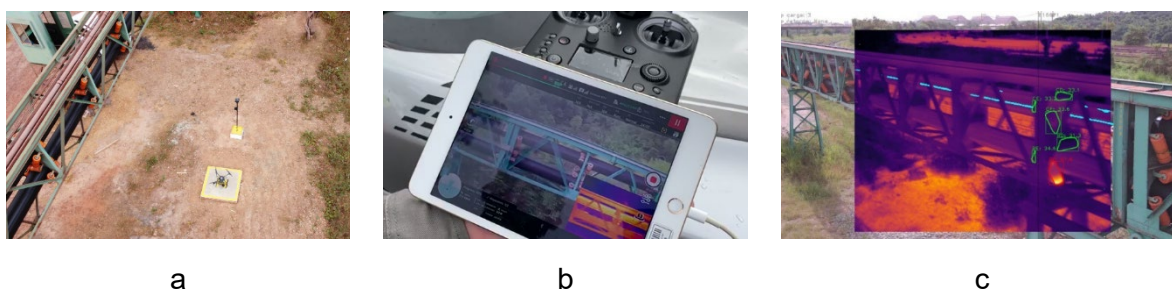


Figura 16. Voos de inspeção automatizados em um transportador tubular utilizando a tecnologia *Deep Track* da empresa brasileira Pix Force: (a) VANT na plataforma de lançamento; (b) voo de inspeção em curso; (c) detecção de rolos e medição de temperatura com câmeras infravermelhas e RGB [5].

## 2.5. MÉTODOS ANALÍTICOS

Nesta seção, propôs-se um método para avaliar a tendência de uma correia a manter sua posição de sobreposição estável em um transportador tubular, com base no torque resultante da interação entre a correia e os rolos dos painéis fechados. Conforme detalhado na seção anterior, diversas causas e fatores contribuintes interagem entre si em processos altamente não lineares que podem desencadear a rotação incontável da correia. O método proposto consiste em obter o torque de retenção em torno do eixo central da correia de um transportador tubular curvo, utilizando um segmento reto teórico equivalente e o momento rotacional da correia, por meio de simulação ou medição das forças de contato. Em seguida, aplicou-se um modelo de interferência usando funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal para calcular um índice de estabilidade de sobreposição, variando de 0 a 1.

### 2.5.1. Torque de retenção rotacional

Dado um transportador tubular reto teórico, para o qual se assume a operação em posições ideais de sobreposição da correia nos segmentos de carga e de retorno, sob quaisquer condições admissíveis de enchimento, haverá um torque de retenção rotacional resultante das forças de contato entre a correia e os rolos do transportador, que manterá a estabilidade da posição de sobreposição. De maneira análoga ao efeito das forças radiais de frenagem em um freio de Prony (um sistema de blocos posicionados ao redor de uma polia rotativa em que a frenagem ocorre por pressão radial), esse conceito é aqui expandido para segmentos curvos de transportadores tubulares, visando à obtenção do torque em torno do eixo central da correia (denominado torque de retenção rotacional) em cenários operacionais reais. Desta forma, as seguintes características operacionais devem ser mantidas iguais nas considerações de cálculo de um segmento reto teórico equivalente:

- Elevação de material entre entrada e saída do segmento;

- Tensão longitudinal da correia;
- Variação do grau de enchimento e propriedades dos sólidos a granel;
- Propriedades da correia, condições ambientais e operacionais.

Deste modo, o segmento teórico equivalente constitui um modelo de referência para avaliar o efeito de alterações nas forças de contato decorrentes da rota do transportador ou de outras externalidades em aplicações reais. As forças calculadas a partir do segmento reto equivalente determinam o torque de retenção de referência, enquanto as forças de contato simuladas ou medidas na aplicação real determinam o momento rotacional da correia. A Figura 17 ilustra o segmento reto equivalente a uma seção curva de um transportador tubular.

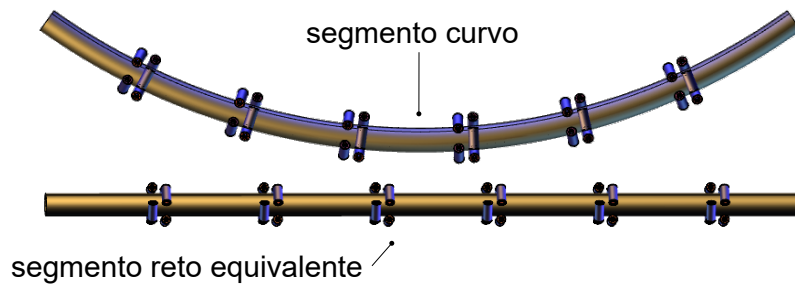


Figura 17. Segmento reto equivalente a uma seção curva em um transportador tubular [5].

O contato do rolo exerce distribuição de pressão na cobertura de retorno da correia tubular, com ambas as superfícies de contato em formato curvo, o que causa deformação viscoelástica da borracha. ZAMIRALOVA e LODEWIJKS [129] assumiram que o contato entre o rolo e a correia tubular apresenta um formato parabolóide elíptico e adotaram uma abordagem analítica para calcular as forças normais atuantes. Os autores utilizaram um modelo generalizado de Maxwell para uma superfície de contato tridimensional conforme apresentado nas Equações (1)–(4). O torque resultante dessa distribuição assimétrica de pressão em torno do eixo central do rolo ocasiona resistência ao rolamento por indentação, em oposição ao movimento da correia [162]. Esse modelo foi adaptado para descrever o torque de retenção em torno do eixo central da correia, que neutraliza seu momento rotacional e determina o

comportamento da posição de sobreposição durante o movimento de rotação da correia. O modelo de cálculo é apresentado na Figura 18 (a–b).

$$w(x, y) = z_0 - \frac{x^2}{2R_1} - \frac{y^2}{2R_2}, \quad \begin{cases} -b \leq x \leq a \\ a > b \\ -c \leq y \leq c \\ x \ll R_1 \\ y \ll R_2 \\ R_2 = R_{nom} + h \end{cases}, \quad (1)$$

$$\sigma(x, y) = \frac{E_0}{2R_1 h'} (a^2 - x^2) + \sum_{i=1}^m \frac{E_i k_i}{h' R_1} \left\{ x - a + \left[ (a + k_i) \left( 1 - e^{-\frac{x-a}{k_i}} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$k_i = \frac{\eta_i V_b}{E_i}, \quad (3)$$

$$F_{Nstr} = 2 \int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y, z_0)}^{a(y, z_0)} \sigma(x, y) dx dy, \quad w(0, c) = 0 \quad \therefore c = \sqrt{2R_2 z_0}, \quad (4)$$

onde  $w(x, y)$  é a profundidade de deformação viscoelástica da superfície de contato [m];  $z_0$  é a profundidade máxima de indentação [m];  $x$ ,  $y$  e  $z$  constituem um plano cartesiano tridimensional;  $R_1$  é o raio do rolo de um painel fechado [m];  $R_2$  é o raio externo da correia tubular [m];  $R_{nom}$  é o raio nominal da correia tubular [m];  $h$  é a espessura da correia tubular [m];  $h'$  é a espessura da camada de retorno da correia tubular [m];  $\sigma(x, y)$  é a distribuição de pressão na superfície de contato viscoelástica [Pa];  $E_0$  é o módulo de equilíbrio do modelo generalizado de Maxwell [Pa];  $a$  é o ponto de contato inicial entre o rolo e a correia tubular;  $b$  é o ponto de contato final entre o rolo e a correia tubular;  $c$  é a meia largura da superfície de contato paraboloide elíptica [m];  $m$  é o número de elementos do Modelo Generalizado de Maxwell;  $E_i$  representa o  $i$ -ésimo elemento elástico (mola) do Modelo Generalizado de Maxwell [Pa];  $k_i$  é comprimento característico de relaxação [m];  $\eta_i$  representa o  $i$ -ésimo elemento viscoso (amortecedor) do modelo generalizado de Maxwell [Pa·s];  $V_b$  é a velocidade escalar longitudinal da correia [m/s];  $F_{Nstr}$  é a força de contato [N] para o segmento reto equivalente do transportador tubular.

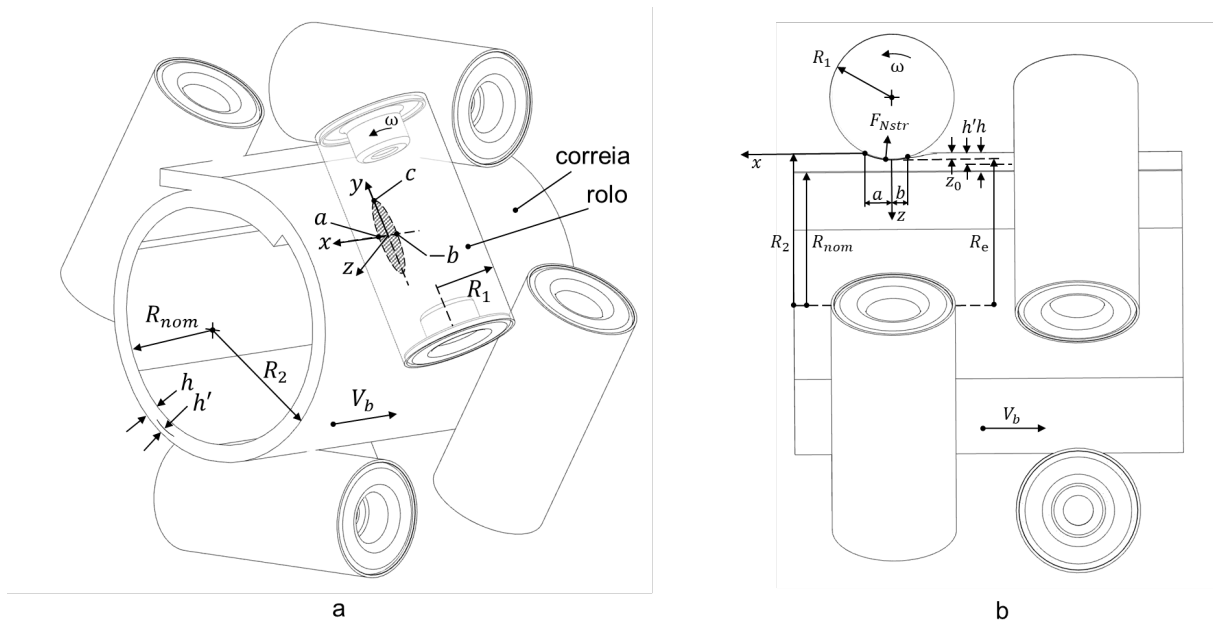


Figura 18. Variáveis para o cálculo do torque de retenção de uma correia transportadora tubular: (a) representação da superfície de contato viscoelástica entre a correia e os rolos; (b) vista lateral da deformação viscoelástica [5].

O torque em torno do centro da correia origina-se da superfície de contato viscoelástica; portanto, o raio efetivo é de interesse de pesquisa, análogo ao cálculo do torque de frenagem em um freio a disco [163]. Assim, o raio efetivo resulta da soma do raio nominal da correia e de sua espessura, menos a profundidade de indentação na superfície de contato. O torque de retenção de um determinado rolo é, portanto, uma função do coeficiente de atrito com a cobertura de retorno, da força de contato na superfície viscoelástica e do raio efetivo da correia [163].

O coeficiente de atrito para borrachas, adaptado de GABRIEL [164] no contexto de correias transportadoras tubulares, é influenciado por vários fatores e é comumente expresso como uma função das seguintes forças de atrito por:

- Adesão, resultante da interação intermolecular entre a cobertura de retorno da correia e os rolos do transportador;

- Histerese, resultante da dissipação de energia viscoelástica por meio da deformação da cobertura de retorno da correia;
- Viscosidade, resultante do cisalhamento viscoso de águas pluviais na interface entre a cobertura de retorno da correia e os rolos do transportador;
- Coesão, resultante das fissuras na cobertura de retorno da correia, bem como das irregularidades decorrentes do desgaste e da rugosidade microscópica das superfícies da cobertura de retorno e dos rolos do transportador.

As forças de atrito causadas pela adesão são as principais contribuintes do coeficiente de atrito; entretanto, a componente de histerese não deve ser negligenciada [165]. As forças viscosas ocorrem principalmente sob condições climáticas adversas, e as forças de coesão resultam do desgaste superficial decorrente de mecanismos de envelhecimento. Segundo MAEGAWA *et al.* [165], o mecanismo de contato envolvendo superfícies deslizantes de borracha é não linear, o que dificulta a previsão da dependência entre as forças normais e a área real de contato.

O contato total entre superfícies é formado quando forças de contato suficientemente elevadas são aplicadas, resultando na área de contato se aproximando de seu valor nominal e na separação interfacial se aproximando de zero, conforme derivado no modelo de Persson [165-167] e expresso na Equação (5). A pressão de compressão nominal  $p$  na área de contato é adaptada no modelo proposto para considerar a distribuição de pressão  $\sigma(x, y)$  na superfície de contato viscoelástica (Equação (2)), e o coeficiente de atrito por adesão é derivado conforme expresso nas Equações (5)–(7):

$$A = A_0 \operatorname{erf}\left(\frac{p}{2G^{1/2}}\right) = 2 \int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{R_2}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma(x,y)}{2G^{1/2}}\right) dx dy \quad , \quad (5)$$

$$G = \frac{(E^*)^2 k^2}{8(1-\nu^2)^2}, \quad (6)$$

$$\mu_{adh} = \frac{\tau' A}{F_{Nstr}} = \frac{\tau' \int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{R_2}\right)^2} \operatorname{erf} \left\{ \frac{\sigma(x,y)}{2 \left[ \frac{(E^*)^2 \kappa^2}{8(1-\nu^2)} \right]^{1/2}} \right\} dx dy}{\int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} \sigma(x,y) dx dy}, \quad (7)$$

onde  $\mu_{adh}$  é o coeficiente de atrito por adesão, adimensional;  $\tau'$  é a tensão de cisalhamento por atrito que atua na área de contato [Pa];  $A$  é a área de contato real [m<sup>2</sup>];  $A_0$  é a área de contato nominal [m<sup>2</sup>];  $F_{Nstr}$  é a força de contato no segmento reto equivalente do transportador tubular [N];  $a$  é o ponto de contato inicial entre o rolo e a correia tubular;  $b$  é o ponto de contato final entre o rolo e a correia tubular;  $c$  é a meia largura da superfície de contato paraboloide elíptica [m];  $R_1$  é o raio do rolo de um painel fechado [m];  $R_2$  é o raio externo da correia tubular [m];  $\sigma(x,y)$  é a distribuição de pressão na superfície de contato viscoelástica [Pa];  $p$  é a pressão nominal de compressão na área de contato [Pa];  $G$  é a variância da distribuição de pressão na interface de contato [Pa<sup>2</sup>].  $E^*$  é o módulo de elasticidade complexo da correia [Pa];  $\nu$  é o coeficiente de Poisson da correia, adimensional;  $\kappa$  é a inclinação média quadrática do perfil de rugosidade, adimensional.

Adotou-se um coeficiente de atrito por histerese derivado do modelo de Klüppel e Heinrich [168] que considera a pressão e velocidade macroscópica aplicadas, conforme expresso na Equação (8). A profundidade média de deformação da borracha  $\langle z_p \rangle$  é adaptada no modelo proposto para considerar o valor médio da profundidade de deformação viscoelástica na superfície de contato  $w(x,y)$ .

$$\begin{aligned} \mu_{hys} &= \frac{1}{2(2\pi)^2} \frac{\langle z_p \rangle}{\sigma_0 v} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \omega E''(\omega) S(\omega) d\omega \\ &= \frac{1}{2(2\pi)^2} \frac{\left( \frac{\int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} w(x,y) dx dy}{c(a+b)} \right)}{\sigma(x,y)v} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \omega E''(\omega) S(\omega) d\omega, \end{aligned} \quad (8)$$

onde  $\mu_{hys}$  é o coeficiente de atrito por histerese, adimensional;  $\langle z_p \rangle$  é a profundidade média de deformação da borracha [m];  $\sigma_0$  é a tensão normal aparente da área de contato macroscópica [Pa];  $\omega$  é a frequência angular da excitação induzida na borracha [Hz];  $E''(\omega)$  é

o módulo de perda dependente da frequência do material de borracha [Pa];  $S(\omega)$  é a densidade de potência espectral devido à deformação da borracha sobre os rolos [ $\text{Hz}^{-1}$ ];  $v$  é a velocidade de deslizamento [m/s];  $a$  é o ponto de contato inicial entre o rolo e a correia tubular;  $b$  é o ponto de contato final entre o rolo e a correia tubular;  $c$  é a meia largura da superfície de contato paraboloide elíptica [m];  $R_1$  é o raio do rolo de um painel fechado [m];  $R_2$  é o raio externo da correia tubular [m];  $w(x, y)$  é a profundidade de deformação viscoelástica da superfície de contato [m];  $\sigma(x, y)$  é a distribuição de pressão na superfície de contato viscoelástica [Pa].

Portanto, o coeficiente de atrito para o contato entre a cobertura de retorno da correia e os rolos do transportador é definido, pela Equação (9):

$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{hys} + \mu_{visc} + \mu_{coh}, \quad \mu_{adh} + \mu_{hys} \gg \mu_{visc} + \mu_{coh}, \quad (9)$$

onde  $\mu_{adh}$  é o coeficiente de atrito por adesão, adimensional (Equação (7));  $\mu_{hys}$  é o coeficiente de atrito por histerese, adimensional (Equação (8));  $\mu_{visc}$  é o coeficiente de atrito viscoso, adimensional;  $\mu_{coh}$  é o coeficiente de atrito por coesão, adimensional.

Finalmente, o torque de retenção total de um determinado segmento de um transportador tubular, compreendendo  $u$  painéis hexagonais, cada um composto por seis rolos, é expresso como uma dupla soma, conforme desenvolvido nas Equações (10)–(12):

$$R_e = R_{nom} + h - \frac{\int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} w(x,y) dx dy}{c(a+b)}, \quad (10)$$

$$T_r = \mu F_{Nstr} R_e = \mu \left( 2 \int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} \sigma(x,y) dx dy \right) \left( R_{nom} + h - \frac{\int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} w(x,y) dx dy}{c(a+b)} \right), \quad (11)$$

$$T_{total(u)} = \sum_{k=1}^u \sum_{j=1}^6 T_{r(k,j)}, \quad (12)$$

onde  $R_e$  é o raio efetivo da correia tubular [m];  $R_{nom}$  é o raio nominal da correia tubular [m];  $h$  é a espessura da correia [m];  $a$  é o ponto de contato inicial entre o rolo e a correia tubular;  $b$  é o ponto de contato final entre o rolo e a correia tubular;  $c$  é a meia largura da superfície de

contato paraboloide elíptica [m];  $R_1$  é o raio do rolo de um painel fechado [m];  $R_2$  é o raio externo da correia tubular [m];  $w(x, y)$  é a profundidade de deformação viscoelástica da superfície de contato [m];  $T_r$  é o torque de retenção para um determinado rolo [ $N \cdot m$ ];  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre o rolo e a cobertura de retorno da correia tubular, adimensional;  $F_{Nstr}$  é a força de contato do segmento reto equivalente do transportador tubular [N];  $\sigma(x, y)$  é a distribuição de pressão na superfície de contato viscoelástica [Pa];  $u$  é o número de painéis em um determinado segmento fechado do transportador tubular;  $k$  representa o  $k$ -ésimo painel de rolos em um dado segmento fechado do transportador tubular;  $j$  representa o  $j$ -ésimo rolo pertencente a um dado painel fechado do transportador tubular;  $T_{total(u)}$  é o torque de retenção total de um segmento fechado de um transportador tubular composto por  $u$  painéis [ $N \cdot m$ ].

Conforme discutido na Seção 2.4, as forças de contato dependem de vários fatores que podem interagir entre si de maneira altamente não linear, causando a rotação indesejável da correia. As abordagens experimentais desempenham um papel fundamental no ajustamento e na validação de métodos analíticos, numéricos e acoplados. Existem diversas variantes de reforços e propriedades das borrachas utilizadas em correias tubulares, de acordo com as estratégias de cada fabricante, o que cria características e desafios únicos em cada projeto. Estimativas adequadas do torque de retenção nos estágios conceituais podem orientar o processo de tomada de decisão de projeto, influenciando todo o ciclo de vida e a estabilidade operacional de um transportador tubular. Desse modo, a adoção de premissas conservadoras e a utilização de modelos simplificados otimizam tempo e recursos durante os estágios iniciais do projeto, complementando, portanto, a especificação de testes em escala reduzida, a análise combinada de MEF e MED para determinar as forças de contato atuantes, a quantificação da fluidez dos materiais a granel a manusear e a medição das propriedades mecânicas e reológicas da correia tubular.

Seguindo essa abordagem, utilizou-se, como referencial, o modelo linear proposto por GUO *et al.* [18] (Equação (13)), que calcula as forças de contato entre a correia tubular e os rolos do transportador como função da força de formação da correia (força de abertura), da força-peso do material manuseado (Equação (16)) e da força-peso da correia tubular (Equação (15)). Esse método acoplado utiliza um dispositivo experimental de medição de seis pontos e análise pelo MEF para obter um modelo simplificado das forças de contato atuantes no segmento reto fechado de um transportador tubular, o qual atende adequadamente aos objetivos dessa pesquisa para o cálculo do torque de retenção. No estudo de caso, utilizando o método proposto, os rolos foram numerados conforme a sequência adotada no programa de computador especializado Belt Analyst (versão 20.1.3.0, 2021), com a posição inferior identificada como o primeiro rolo, seguida de contagem no sentido anti-horário, conforme a direção de funcionamento do segmento de carga da correia (Figura 1). Para aprimorar o modelo linear, propuseram-se fatores de ajuste com base no grau de enchimento da correia, obtidos por meio de simulações no estudo de caso. Durante a simulação computacional, variou-se o grau de enchimento da correia de 0% a 80%, com incrementos de 10%. Dividiram-se, então, as forças simuladas no segmento reto do transportador pelos valores calculados com base no modelo linear proposto por GUO *et al.* [18], obtendo-se os fatores de ajuste, conforme apresentados na Equação (14).

Assumiu-se a força de formação da correia calculada por WESEMEIER [169] e derivada da abordagem de CHERNENKO [170], levando em consideração a força de contato radial concentrada pela sobreposição da correia (Equação (17)). Além disso, considerou-se a vida útil remanescente da correia como um fator percentual que varia de sua força nominal de abertura (100%) até a condição de colapso da formação tubular (0%).

Adicionalmente, adotou-se a simplificação do cálculo do coeficiente atrito por adesão, conforme proposto por BHUSHAN [171], que estabeleceu que o coeficiente de atrito  $\mu_{adh}$  sob tensão de cisalhamento constante depende da carga normal em  $\propto F_{Nstr}^{-1/3}$ . Além disso,

adotou-se o coeficiente de atrito por histerese proposto por CIAVARELLA [172], que utilizou uma fórmula simplificada, derivada da teoria de Persson do atrito para borracha devido às perdas viscoelásticas, para estimar  $\mu_{hys}$  como  $\kappa (E''/|E^*|)$ . Em seguida, utilizou-se o valor truncado de  $\kappa$  fixado em 1,3 e a aproximação  $(E''/|E^*|) \cong 1$  conforme proposto no modelo de Persson [172] (Equação (18)). Os coeficientes de atrito viscoso e por coesão são substancialmente inferiores aos coeficientes por adesão e histerese e foram desconsiderados neste modelo. Tais coeficientes poderão ser investigados em futuras abordagens experimentais, que incorporem o efeito de águas pluviais e envelhecimento da correia tubular. O modelo de cálculo é ilustrado na Figura 19 e nas Equações (13)–(20).

$$\begin{aligned}
 F_{Nstr(k,1)} &= F_{1adj} \begin{cases} 0.91 F_{stif} + 0.49 G_b + (-1.18\psi^2 + 0.71\psi + 0.54) G_m, & 80\% \geq \psi \geq 50\% \\ 0.91 F_{stif} + 0.49 G_b + 0.60 G_m, & \psi < 50\% \end{cases}, \\
 F_{Nstr(k,2)} &= F_{2adj} \begin{cases} 0.93 F_{stif} + 0.25 G_b + (-0.50\psi^2 + 0.41\psi + 0.25) G_m, & 80\% \geq \psi \geq 50\% \\ 0.93 F_{stif} + 0.25 G_b + 0.33 G_m, & \psi < 50\% \end{cases}, \\
 F_{Nstr(k,3)} &= F_{3adj} \begin{cases} 1.15 F_{stif} - 0.05 G_b, & \text{borda externa lado direito} \\ 0.95 F_{stif} - 0.05 G_b, & \text{borda externa lado esquerdo} \end{cases}, \\
 F_{Nstr(k,4)} &= F_{4adj} (1.49 F_{stif} - 0.26 G_b - 0.08 G_m), \\
 F_{Nstr(k,5)} &= F_{5adj} \begin{cases} 0.95 F_{stif} - 0.05 G_b, & \text{borda externa lado direito} \\ 1.15 F_{stif} - 0.05 G_b, & \text{borda externa lado esquerdo} \end{cases}, \\
 F_{Nstr(k,6)} &= F_{6adj} \begin{cases} 1.06 F_{stif} + 0.26 G_b + (-1.17\psi^2 + 0.89\psi + 0.19) G_m, & 80\% \geq \psi \geq 50\% \\ 1.06 F_{stif} + 0.26 G_b + 0.34 G_m, & \psi < 50\% \end{cases},
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 F_{1adj} &= 2.5894 \psi^4 - 3.2013 \psi^3 + 2.6390 \psi^2 - 1.8212 \psi + 1.3477, \\
 F_{2adj} &= F_{6adj} = 4.5918 \psi^4 - 6.6449 \psi^3 + 4.6908 \psi^2 - 1.6081 \psi + 0.9905, \\
 F_{3adj} &= F_{5adj} = 11.98 \psi^6 - 20.554 \psi^5 + 13.088 \psi^4 - 3.7948 \psi^3 + 0.486 \psi^2 - 0.0445 \psi + 0.9711, \\
 F_{4adj} &= 0.3606 \psi^4 - 0.1116 \psi^3 + 0.3268 \psi^2 + 0.4116 \psi + 0.7217,
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$G_b = B l' h q g, \tag{15}$$

$$G_m = \rho \pi (R_{nom})^2 \psi l' g, \tag{16}$$

$$F_{stif} = \frac{E'_2}{1-\nu_1 \nu_2} \frac{h^3}{24 R_{nom} \Delta ov} l' \tau, \tag{17}$$

$$\mu \cong \mu_{adh} + \mu_{hys} \cong \begin{cases} F_N^{-\frac{1}{3}}, & F_N > 1 \\ 1, & F_N \leq 1 \end{cases} + \kappa \frac{E''}{|E^*|}, \quad \begin{cases} \kappa = 1,3 \\ \frac{E''}{|E^*|} = 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$T_{r(k)} = \mu F_N R_e = \left( \sum_{j=1}^6 \mu_{(k,j)} F_{N(k,j)} \right) (R_{nom} + h), \quad (19)$$

$$T_{total(u)} = \sum_{k=1}^u \sum_{j=1}^6 \mu_{(k,j)} F_{(k,j)} R_e, \quad R_e = R_{nom} + h, \quad (20)$$

onde  $F_{Nstr(k,j)}$  representa a força de contato do  $j$ -ésimo rolo pertencente ao  $k$ -ésimo painel fechado [N] do segmento reto equivalente do transportador tubular;  $F_N$  é a força normal [N];  $F_{stif}$  é a força de formação da correia [N];  $F_{jadj}$  é o fator de ajuste do  $j$ -ésimo rolo baseado no grau de enchimento da correia, adimensional;  $G_b$  é a força-peso da correia [N];  $G_m$  é a força-peso do granel sólido manuseado [N];  $B$  é a largura da correia [m];  $l'$  é o espaçamento entre painéis fechados do transportador [m];  $\tau$  é a vida útil remanescente da correia [%];  $h$  é a espessura da correia [m];  $q$  é a densidade da correia [kg/m<sup>3</sup>];  $\rho$  é a densidade do granel sólido [kg/m<sup>3</sup>];  $R_{nom}$  é o raio nominal da correia tubular [m];  $R_e$  é o raio efetivo da correia tubular [m];  $\psi$  é o grau de enchimento da correia fechada [%], variando de 0% a 80%;  $g$  é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];  $E^*$  é o módulo de elasticidade complexo da correia [Pa];  $E'_2$  é o módulo de armazenamento da correia na direção lateral [Pa];  $E''$  é o módulo de perda da correia [Pa];  $\kappa$  é a inclinação média quadrática do perfil de rugosidade, adimensional;  $\nu_1$  e  $\nu_2$  são os coeficientes de Poisson da correia nas direções longitudinal e lateral, respectivamente, adimensionais;  $\Delta_{ov}$  é o comprimento da sobreposição das bordas da correia fechada [m];  $u$  é o número de painéis em um determinado segmento fechado do transportador;  $k$  representa o  $k$ -ésimo painel de rolos em um dado segmento fechado do transportador tubular;  $j$  representa o  $j$ -ésimo rolo pertencente a um dado painel fechado do transportador tubular;  $T_{r(k)}$  é o torque de retenção do  $k$ -ésimo painel de rolos [N·m];  $\mu_{(k,j)}$  é o coeficiente de atrito entre o  $j$ -ésimo rolo pertencente ao  $k$ -ésimo painel fechado e a cobertura de retorno da correia tubular, adimensional;  $\mu_{adh}$  é o coeficiente de atrito por adesão, adimensional (Equação (7));  $\mu_{hys}$  é o coeficiente de atrito por histerese, adimensional (Equação (8));  $\mu$  é o coeficiente de atrito,

adimensional;  $T_{total(u)}$  é o torque de retenção total de um determinado segmento fechado do transportador composto por  $u$  painéis fechados [N·m]. A borda externa da sobreposição é definida nos rolos de moldagem das zonas de transição, com base no lado da correia selecionado arbitrariamente e na configuração da instalação.

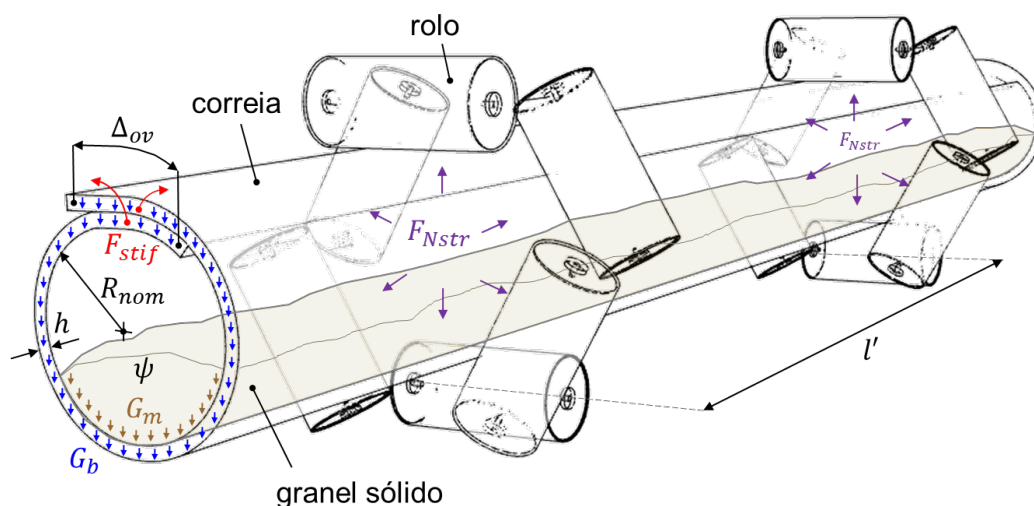


Figura 19. Variáveis para cálculo das forças de contato em uma correia transportadora tubular usando o modelo linear proposto [5].

### 2.5.2. Índice de estabilidade de sobreposição

Propõe-se o cálculo de um índice de estabilidade de sobreposição de uma correia fechada em um transportador tubular, avaliando a região de interferência entre as funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal do momento rotacional da correia e do torque de retenção dos rolos, variando de 0 a 1. Esse método considera a função mínima entre essas duas funções de densidade, bem como o modelo de interferência tensão-resistência [173], que consiste em quantificar a probabilidade de um parâmetro de tensão (carga) ser superior a um parâmetro de resistência (capacidade), assumindo que ambos são estatisticamente independentes.

Aplicou-se a função de estimação Kernel para calcular as funções de densidade de probabilidade. Essa escolha baseou-se tanto na característica de carregamento típica de um transportador tubular quanto na abordagem intuitiva para a análise de dados multivariados, possibilitada por essa abordagem, o que confere uma notável vantagem ao uso desse método [174]. A operação de um transportador tubular ocorre tipicamente a vazio ou com grau de enchimento nominal, resultando em uma resposta de densidade de probabilidade não paramétrica associada ao grau de enchimento e, conseqüentemente, às forças de contato. Desse modo, optou-se pela suavização por Kernel-normal, que é a função Kernel multivariada mais amplamente utilizada [175].

A suavização por Kernel consiste em centralizar, em cada observação, uma função escalonada de integral unitária (uma função de densidade de probabilidade unimodal e simétrica, ajustada por uma largura de banda). O valor da estimativa do Kernel em um determinado ponto representa a média das funções escalonadas de todas as observações nesse ponto. Ao combinar as contribuições de cada amostra, a estimativa do Kernel assumirá uma densidade de probabilidade relativamente mais alta onde a densidade verdadeira apresenta maior valor [174]. Nesse estudo de caso, utilizou-se a função `scipy.stats.gaussian_kde` inclusa na biblioteca Python de código aberto SciPy para o cálculo das funções de densidade suavizadas por Kernel-normal.

Adotaram-se o momento rotacional de uma correia tubular fechada e seu torque de retenção como parâmetros de carga e capacidade, respectivamente, em um modelo de tensão-resistência acoplado a uma função mínima. Adotou-se o valor ótimo do índice *OSI* como 0,5, que representa a sobreposição total de ambas as funções de densidade suavizadas por Kernel-normal. À medida que o valor do índice *OSI* diminui (aproximando-se de 0), deduz-se que a correia tende a rotacionar devido à perda de contato com os rolos dos painéis fechados. Por outro lado, um aumento no valor do índice *OSI* (aproximando-se de 1) indica uma elevação da força de contato, induzindo a rotação da correia devido à flecha da correia entre

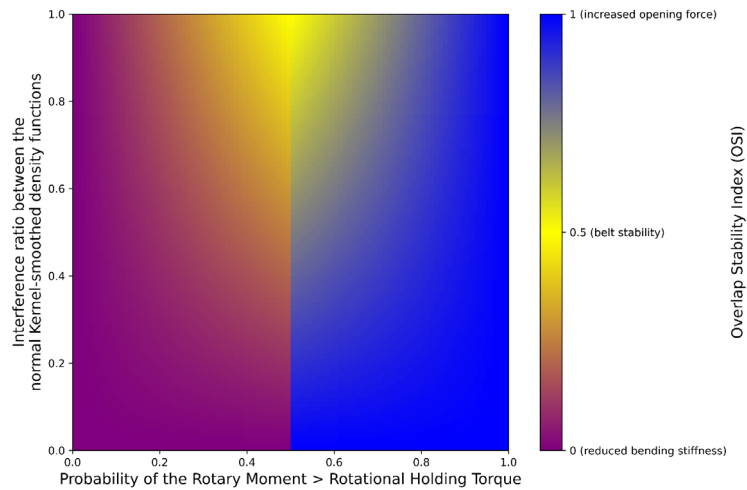
painéis (conforme apresentado na Seção 2.4). A Figura 20 (a–d) ilustra o modelo de interferência utilizado para calcular o índice *OSI*, conforme expresso nas Equações (21)–(23).

$$A_{interf} = \int_0^{\infty} \min \{ f_{T_{total(u)}}(T), f_{M_{rot(u)}}(T) \} dT, \quad (21)$$

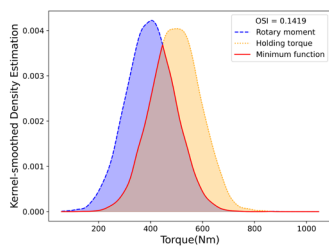
$$Prob_{M>T} = \int_0^{\infty} F_{T_{total(u)}}(T) f_{M_{rot(u)}}(T) dT, \quad (22)$$

$$OSI = \begin{cases} A_{interf} Prob_{M>T}, & Prob_{M>T} < 50\% \\ 1 - [A_{interf}(1 - Prob_{M>T})], & Prob_{M>T} \geq 50\% \end{cases} \quad (23)$$

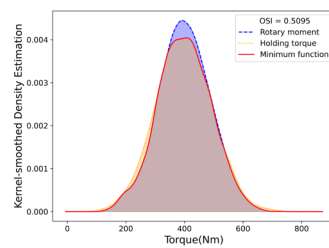
onde  $u$  é o número de painéis em um determinado segmento fechado do transportador;  $A_{interf}$  é a área da região de interferência entre as funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal;  $Prob_{M>T}$  é a probabilidade do parâmetro momento rotacional ser maior que o parâmetro torque de retenção em um segmento fechado do transportador tubular composto por  $u$  painéis;  $OSI$  é o índice de estabilidade de sobreposição de um segmento fechado do transportador tubular composto por  $u$  painéis;  $f_{T_{total(u)}}(T)$  é a função de densidade de probabilidade suavizada por Kernel-normal do torque de retenção de um segmento fechado do transportador tubular composto por  $u$  painéis;  $f_{M_{rot(u)}}(T)$  é a função de densidade de probabilidade suavizada por Kernel-normal do momento rotacional da correia em um segmento fechado do transportador tubular composto por  $u$  painéis;  $F_{T_{total(u)}}(T)$  é a função de distribuição acumulada suavizada por Kernel-normal do torque de retenção de um segmento fechado do transportador tubular composto por  $u$  painéis;  $T$  é a coordenada de torque no plano de integração [N·m].



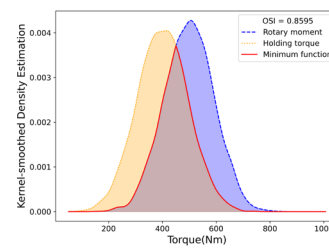
a



b



c



d

Figura 20. Modelo de interferência e funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal: (a) visão gráfica do índice *OSI*; (b) condições instáveis devido à redução da rigidez transversal; (c) condições estáveis; (d) condições instáveis devido ao aumento da força de abertura [5].

### 2.5.3. Método experimental

Aplicou-se a metodologia proposta em um estudo de caso referente a um transportador tubular de curta distância utilizado em um sistema de manuseio de carvão mineral betuminoso a granel. As razões para a seleção desse transportador incluem alguns aspectos desafiadores de projeto e operacionais, como a utilização de correia tubular têxtil (tipicamente de maior flexibilidade transversal), elevado número de ciclos de abertura e fechamento da correia devido ao reduzido comprimento horizontal do transportador, elevada velocidade escalar da correia, rota composta por alternância de curvas (direita e esquerda), operação sob incidência

solar direta ou chuva moderada, bem como estratégias de paradas sazonais prolongadas. A rotação da correia no segmento de carga desse transportador é um modo de falha persistente que inclui o desalinhamento fantasma e eventos de dobra da correia na zona de transição da estação de descarga. A Tabela 3 apresenta os principais dados desse equipamento.

Tabela 3. Dados do transportador tubular de curta distância selecionado [5].

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Granel sólido	-	Carvão betuminoso
Capacidade de projeto	ton/h	1.000,00
Largura da correia	m	1,45
Espaçamento entre painéis fechados	m	2,00
Espessura da correia tubular	mm	19,00
Massa linear da correia tubular	kg/m	30,70
Densidade do pó ou granel sólido	kg/m <sup>3</sup>	881,00
Diâmetro nominal da formação tubular	mm	375,00
Posição da borda externa de sobreposição	Esquerda ou Direita	Esquerda
Módulo de armazenamento da correia na direção lateral	MPa	10,00
Coefficiente de Poisson da correia na direção longitudinal	-	0,45
Coefficiente de Poisson da correia na direção lateral	-	0,45
Velocidade escalar da correia	m/s	4,90
Comprimento desenvolvido	m	614,02

A demanda média anual desse sistema de manuseio consiste em dez lotes de carvão mineral, com tempo médio de descarga de cinco dias cada, totalizando 13,7% de utilização anual. O equipamento é utilizado predominantemente no período seco, de julho a dezembro, como parte das estratégias operacionais da unidade para minimizar as perdas do poder calorífico da matéria-prima.

Esse estudo de caso consistiu em uma avaliação comparativa das forças de contato, modeladas com observações de campo, para investigar a rotação da correia tubular. As seguintes etapas foram executadas:

- Aquisição de dados de operação. Essa etapa envolveu a coleta de dados sobre o grau de enchimento da correia tubular durante as operações de manuseio em um lote típico. Os dados de vazão mássica foram coletados, historicizados e processados no aplicativo OSIsoft PI System (por meio do módulo PI DataLink 2017 SP2 integrado ao Microsoft Excel), com intervalos de 5 minutos, durante uma operação de manuseio, com duração típica de 5 dias. A balança dinâmica do sistema de manuseio fica localizada a montante desse transportador tubular, e os dados de vazão mássica foram registrados em toneladas por hora.
- Coleta dos parâmetros de projeto. Essa etapa compreendeu a coleta de dados técnicos, incluindo curvas e cotas da rota do transportador, bem como as especificações do equipamento, disponíveis em desenhos, esquemas, cálculos estruturais e mecânicos.
- Harmonização percentual do grau de enchimento. Essa etapa compreendeu o cálculo do grau de enchimento e a harmonização dos dados em incrementos de 10% para corresponder aos degraus parametrizados no programa de computador utilizado para simulação. Programou-se um código em linguagem Python (versão 3.10.8, 2022) para essa finalidade e aplicou-se a conversão apresentada na Equação (24):

$$\psi_{harm} = \begin{cases} 0, & 0.00 \leq \psi_m \leq 0.01 \\ 0.1, & 0.01 < \psi_m \leq 0.11 \\ 0.2, & 0.11 < \psi_m \leq 0.21 \\ 0.3, & 0.21 < \psi_m \leq 0.31 \\ 0.4, & 0.31 < \psi_m \leq 0.41, \\ 0.5, & 0.41 < \psi_m \leq 0.51 \\ 0.6, & 0.51 < \psi_m \leq 0.61 \\ 0.7, & 0.61 < \psi_m \leq 0.71 \\ 0.8, & 0.71 < \psi_m \leq 1.00 \end{cases} \quad (24)$$

onde  $\psi_{harm}$  é o grau de enchimento harmonizado da correia tubular [%];  $\psi_m$  representa o grau de enchimento mensurado da correia tubular [%].

- Simulação das forças de contato nos segmentos curvos. Essa etapa compreendeu o cálculo das forças de contato da correia nos segmentos curvos utilizando o programa de computador especializado *Belt Analyst*, considerando a operação a vazio do transportador até o enchimento de 80% da correia, em incrementos de 10%. Exportaram-se, então, os dados da simulação em formato de planilha eletrônica para posterior processamento.
- Avaliação das perdas de contato nos segmentos curvos. Essa etapa envolveu a avaliação das perdas de contato da correia com os rolos dos painéis fechados, que possam ter contribuído para a rotação. Para isso, utilizaram-se rótulos de advertência em gráficos de radar, gerados em Python, para cada posição dos rolos nos segmentos curvos.
- Cálculo das forças de contato no segmento reto teórico equivalente. Essa etapa compreendeu o cálculo das forças de contato da correia considerando um segmento reto equivalente teórico, utilizando a metodologia proposta. Considerou-se a operação a vazio do transportador até o enchimento de 80% da correia, em incrementos de 10%. Utilizou-se a linguagem Python para processar e armazenar os dados calculados.
- Cálculo do torque de retenção e do momento rotacional. Essa etapa envolveu o cálculo do torque de retenção e do momento rotacional da correia com base nas forças de contato calculadas e simuladas, considerando também o coeficiente de atrito conforme proposto nessa metodologia. Utilizou-se a linguagem Python para gerar as séries temporais correspondentes a cada rolo e aos valores totalizados.
- Estimativa das funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal. Essa etapa compreendeu o cálculo numérico da função mínima e do modelo tensão-resistência para estimar, por Kernel-normal, as probabilidades suavizadas do torque

de retenção e do momento rotacional da correia. Disponibilizou-se uma visualização gráfica das densidades de probabilidade, em Python, para cada seção curva do segmento de carga do transportador.

- Cálculo do *OSI*. Calculou-se o índice *OSI* utilizando uma biblioteca de integração em Python, conforme a metodologia proposta. Desenvolveu-se um programa de computador para calcular o índice em cada seção curva do segmento de carga do transportador.
- Avaliação da instalação em campo. Essa etapa envolveu a inspeção visual do transportador tubular nos pontos de interesse, para análise e discussão dos achados e das perspectivas. Inspeccionaram-se os segmentos críticos mapeados na avaliação das perdas de contato e aqueles para os quais o *OSI* apresentou as maiores diferenças em relação ao valor ótimo.

## 2.6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desenvolveu-se um programa de computador em linguagem Python para processar as entradas na forma de arquivos eletrônicos de texto com valores separados por vírgula CSV (em inglês: *comma-separated values*) e adicionaram-se as seguintes variáveis para processamento dos parâmetros de projeto do equipamento:

- Largura da correia;
- Espaçamento entre painéis fechados;
- Espessura da correia tubular;
- Massa linear da correia tubular;
- Densidade do pó ou granel sólido;
- Diâmetro nominal da formação tubular;
- Posição da borda externa de sobreposição (esquerda ou direita);
- Módulo de armazenamento da correia na direção lateral;

- Coeficiente de Poisson da correia na direção longitudinal;
- Coeficiente de Poisson da correia na direção lateral;
- Velocidade escalar da correia;
- Vida remanescente da correia.

O primeiro arquivo CSV, relativo à coleta de dados reais, continha 1.267 valores de vazão mássica (em toneladas por hora) rotulados com data e hora. Os dados foram amostrados a cada cinco minutos durante a operação de manuseio de um lote unitário, com duração de 4,4 dias. O segundo arquivo CSV, relacionado aos dados simulados no programa de computador especializado, continha dados teóricos de vazão mássica (em toneladas por hora), o identificador numérico de cada segmento curvo, a diferenciação entre carga e retorno para cada segmento e as seis forças de contato (para cada rolo dos painéis fechados hexagonais).

Com base no perfil do transportador, o programa de computador especializado gerou os segmentos em diferentes comprimentos para compor adequadamente a rota do equipamento, conforme mostrado na Tabela 4. Para fins de análise, agruparam-se os segmentos curvos adjacentes que apresentaram valores das forças de contato simuladas próximos entre si, conforme ilustrado na Figura 21.

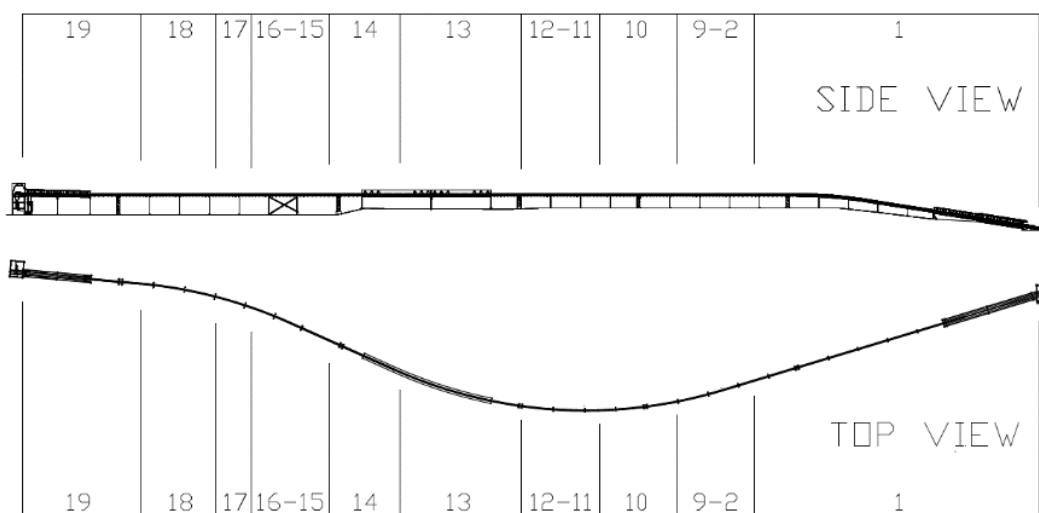


Figura 21. Rota do transportador tubular selecionado com segmentos agrupados [5].

Tabela 4. Detalhes da rota do transportador tubular selecionado [5].

Ponto	Tipo	Raio vertical (m)	Raio horizontal (m)	Direção	Comprimento do segmento (m)	Elevação (m)	Segmentos agrupados
1	Carga			Reta	171,88	16,77	1
2	Carga		270	Direita	7,35	0,72	2-9
3	Carga		270	Direita	5,77	0,60	
4	Carga	150	270	Direita	1,40	0,15	
5	Carga	150	270	Direita	1,40	0,12	
6	Carga	150	270	Direita	0,50	0,04	
7	Carga	170	270	Direita	7,14	0,61	
8	Carga	170	270	Direita	7,17	0,01	
9	Carga	170	270	Direita	16,40	0,01	
10	Carga		270	Direita	46,45	0,04	
11	Carga		270	Direita	23,56	0,02	11-12
12	Carga		270	Direita	23,56	0	
13	Carga		270	Direita	73,44	0	13
14	Carga			Reta	42,44	0	14
15	Carga		270	Esquerda	23,56	0	15-16
16	Carga		270	Esquerda	23,56	0	
17	Carga		270	Esquerda	21,44	0	17
18	Carga			Reta	45,00	0	18
19	Carga			Reta	72,00	0,15	19

Os resultados incluíram a geração de gráficos comparativos entre a vazão mássica e o grau de enchimento harmonizado, bem como um relatório resumido das forças de contato e do torque de retenção para um segmento reto equivalente, considerando a operação a vazio do transportador até o enchimento de 80% da correia, em incrementos de 10%. As etapas seguintes incluíram o cálculo do momento rotacional da correia em cada segmento curvo, com base nos dados de simulação carregados no programa. A Figura 22 e a Tabela 5 apresentam os resultados resumidos da aplicação.

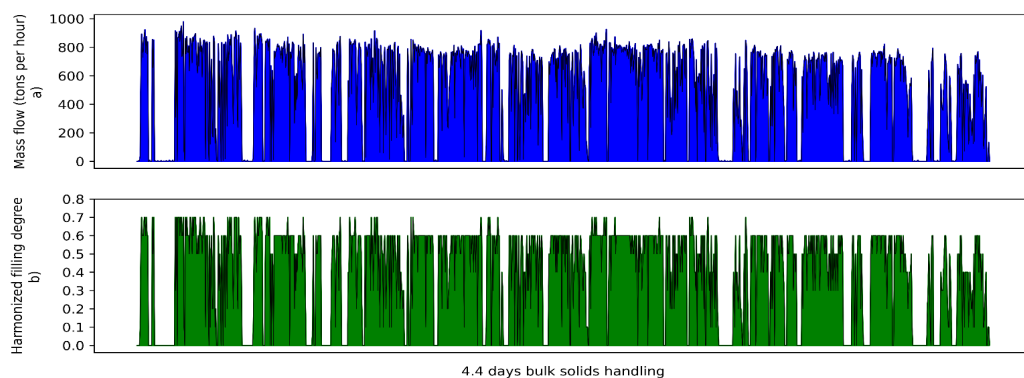


Figura 22. Vazão mássica e grau de enchimento harmonizado com base em dados reais de operação do transportador tubular selecionado [5].

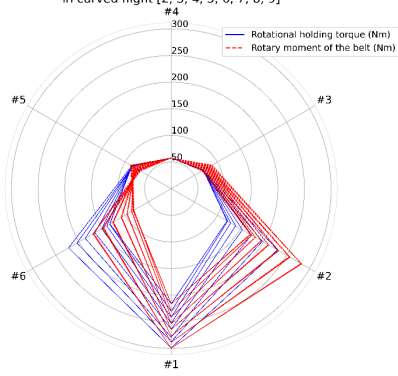
Tabela 5. Forças de contato e torque de retenção da correia tubular em função do seu grau de enchimento harmonizado [5].

		$\psi = 0$	$\psi = 0,1$	$\psi = 0,2$	$\psi = 0,3$	$\psi = 0,4$	$\psi = 0,5$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,7$	$\psi = 0,8$
Forças de contato (N)	F1	742,59	791,36	832,79	870,84	911,16	964,75	994,26	1035,66	1091,19
	F2	408,15	413,51	436,21	473,66	524,66	592,94	676,60	791,55	955,03
	F3	230,14	229,60	229,03	228,42	227,95	227,25	226,69	230,79	253,53
	F4	189,32	189,26	189,32	189,34	189,31	189,28	189,29	189,34	189,30
	F5	284,75	284,09	283,38	282,62	282,04	281,17	280,48	285,55	313,69
	F6	450,32	452,23	473,82	511,72	564,33	637,39	700,60	764,60	815,84
Torque de retenção (N·m)	T1	216,28	230,11	241,84	252,61	264,01	279,15	287,48	299,16	314,82
	T2	120,93	122,47	128,98	139,70	154,28	173,75	197,55	230,16	276,40
	T3	69,54	69,38	69,21	69,04	68,90	68,69	68,53	69,72	76,33
	T4	57,63	57,61	57,63	57,64	57,63	57,62	57,62	57,64	57,63
	T5	85,38	85,19	84,98	84,76	84,59	84,34	84,14	85,61	93,74
	T6	133,02	133,57	139,75	150,58	165,60	186,40	204,37	222,52	237,04
	Total	682,78	698,32	722,39	754,33	795,00	849,96	899,70	964,82	1055,97

Nesse relatório resumido para o segmento reto equivalente, as forças de contato foram numeradas conforme sequenciado no programa de computador especializado *Belt Analyst*, com a posição inferior identificada como F1, bem como o torque correspondente identificado como T1, seguido pela contagem no sentido anti-horário com base na direção de funcionamento do segmento de carga da correia (Figura 1). As forças de contato F1, F2 e F6 aumentaram à medida que o grau de enchimento da correia tubular aumentou, devido à contribuição da força-peso do granel sólido nos rolos inferiores. Quanto aos rolos laterais, as forças de contato F3 e F5 diminuíram com o grau de enchimento entre 0% e 60%, seguidas de um ligeiro aumento a partir de 60%. A diminuição das forças de contato na primeira faixa de enchimento (inferior a 60%) decorre da redução geral do fator de atrito devido à resistência à flexão do material manuseado, o que reduz o fator de indentação da correia tubular [91] [129]. Por outro lado, o aumento das forças de contato na segunda faixa (superior a 60%) ocorre devido à aproximação do grau máximo de enchimento admissível, para o qual se aplicam as recomendações constantes na Tabela 1. Por fim, observou-se estabilidade na força de contato no rolo superior F4, devido à elevada contribuição da força de formação da correia [169,170].

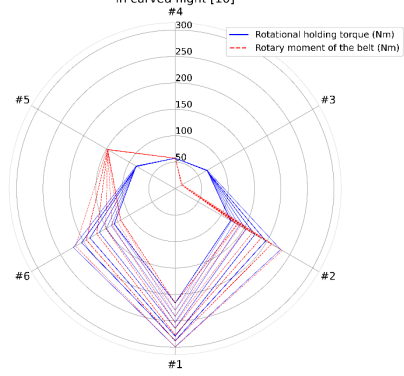
Na sequência, o programa de computador adicionou o torque de retenção e o momento rotacional calculados em cada amostra harmonizada para posterior plotagem em gráficos de radar agrupados por segmentos curvos, conforme ilustrado na Figura 23 (a–f). Rótulos de advertência na cor vermelha indicaram perdas de contato nos rolos afetados. As etapas finais incluíram a estimativa das funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal e o cálculo do *OSI* para cada segmento curvo, utilizando os resultados das etapas anteriores e uma biblioteca para métodos numéricos, conforme mostrado na Figura 24 (a–f).

Pipe conveyor rotational holding torque x rotary moment of the belt in curved flight [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]



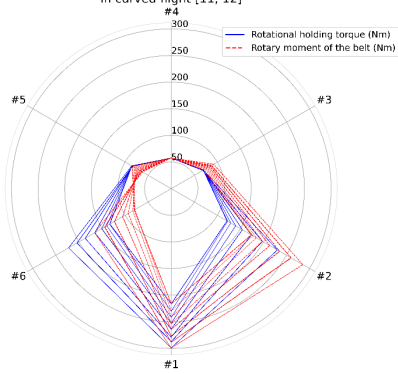
a

Pipe conveyor rotational holding torque x rotary moment of the belt in curved flight [10]



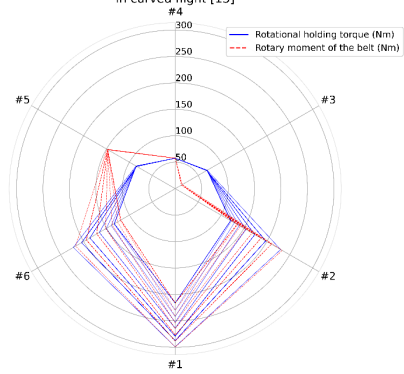
b

Pipe conveyor rotational holding torque x rotary moment of the belt in curved flight [11, 12]



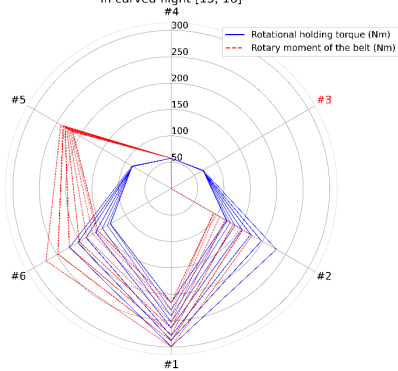
c

Pipe conveyor rotational holding torque x rotary moment of the belt in curved flight [13]



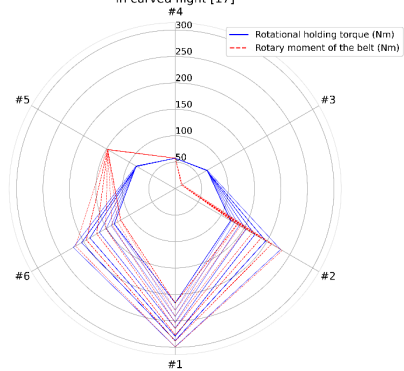
d

Pipe conveyor rotational holding torque x rotary moment of the belt in curved flight [15, 16]



e

Pipe conveyor rotational holding torque x rotary moment of the belt in curved flight [17]



f

Figura 23. Gráficos de radar do torque de retenção e do momento rotacional da correia para os segmentos curvos: (a) 2–9; (b) 10; (c) 11–12; (d) 13; (e) 15–16; (f) 17 [5].

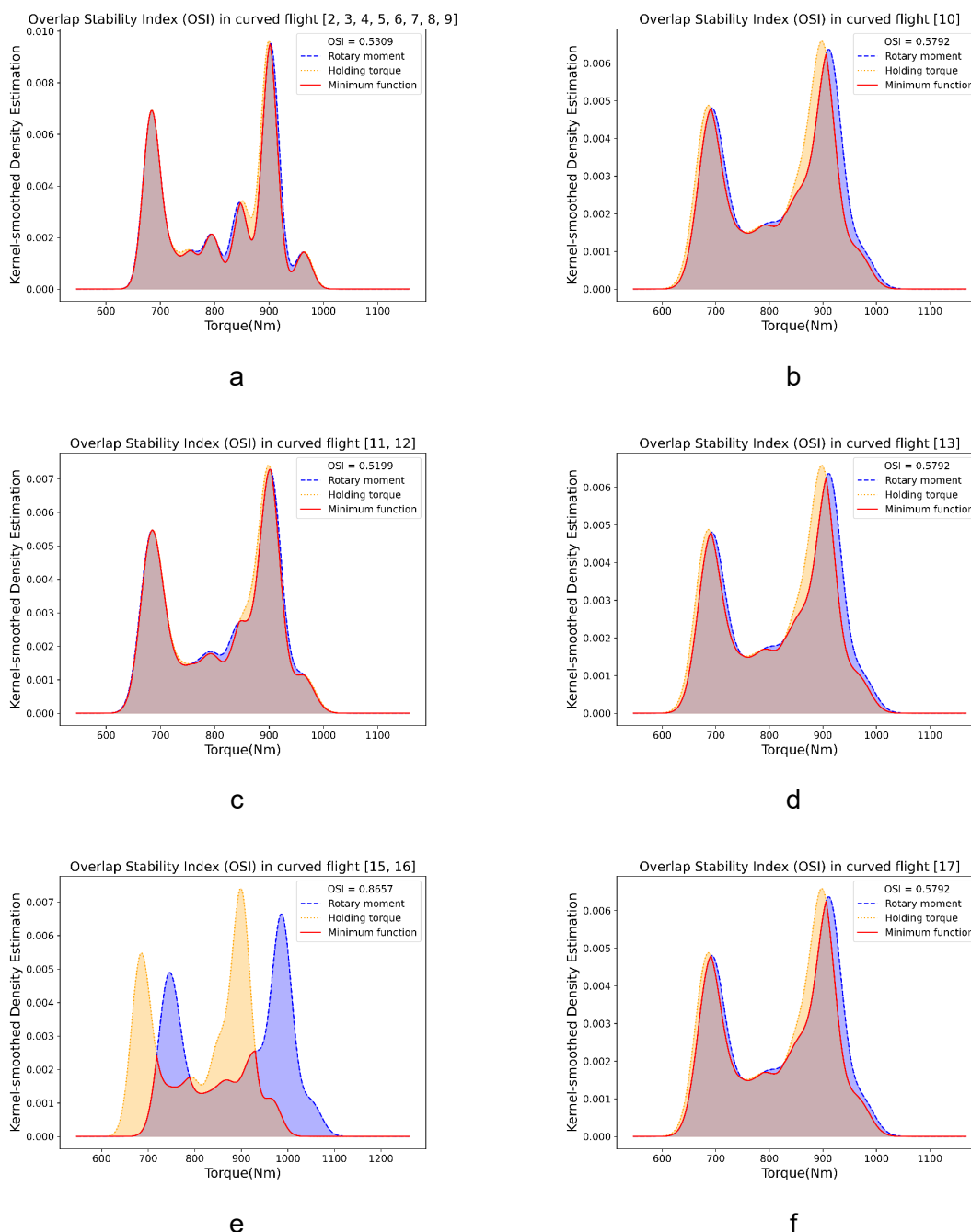


Figura 24. Gráficos das funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal para os segmentos curvos: (a) 2–9; (b) 10; (c) 11–12; (d) 13; (e) 15–16; (f) 17 [5].

A Figura 23 (a-f) ilustra a distribuição do torque de retenção e do momento rotacional da correia nos segmentos curvos por rolo, nas posições 1 a 6. Os resultados demonstraram assimetria nas forças de contato nos rolos laterais superiores 3 e 5, nos segmentos 10, 13, 15–16 e 17, com importante perda de contato na posição 3 e aumento da força de contato na

posição 5. A Figura 24 (a-f) ilustra os gráficos das funções de densidade de probabilidade suavizadas por Kernel-normal para os mesmos segmentos curvos, nos quais se observam dois pontos de concentração de densidade, correspondentes aos graus de enchimento mais prevalentes, quando a correia está vazia ou com 70% de enchimento. Com base no cálculo de estabilidade proposto, o segmento curvo 15–16 apresentou indicações de aumento da força de abertura, com um *OSI* de 0,8657.

O momento rotacional simulado da correia e o torque de retenção calculado indicaram valores próximos entre si para a maioria dos segmentos agrupados, com um *OSI* se aproximando do valor ótimo (0,5), exceto no segmento curvo 15–16, onde o índice indicou tendência de aumento da tensão longitudinal da correia, resultante do esforço lateral na posição 5 do painel de rolos. Além disso, ao avaliar as perdas de contato, ampliou-se a análise de campo para incluir os segmentos 10, 13 e 17, considerando as baixas forças de contato na posição 3 do painel de rolos.

A Figura 25 mostra uma vista superior dos pontos de interesse para inspeção no transportador tubular selecionado. Inspeccionou-se o equipamento no estado de energia zero e registraram-se os ângulos de sobreposição no momento da inspeção visual, bem como as distâncias entre a cobertura de retorno da correia e os seis rolos de cada painel inspecionado, conforme apresentado na Tabela 6.

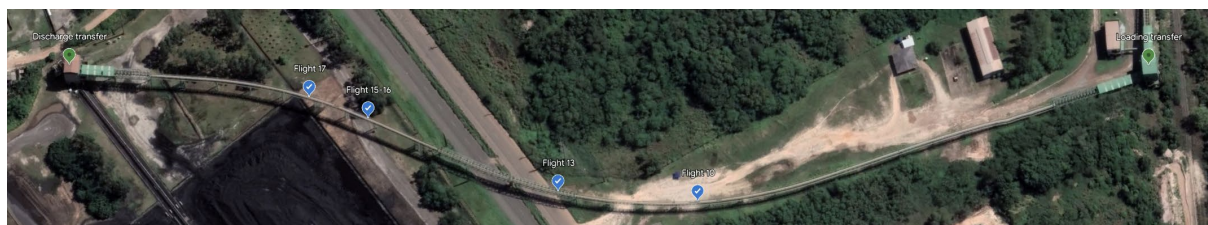


Figura 25. Vista superior dos pontos de interesse para inspeção de campo no transportador tubular [5].

Tabela 6. Levantamento de campo dos segmentos curvos de interesse [5].

Segmento curvo	Ângulo de sobreposição (°)	Distância para a cobertura de retorno da correia tubular (mm)					
		Rolo 1	Rolo 2	Rolo 3	Rolo 4	Rolo 5	Rolo 6
10	10	0	0	0	30	42	0
13	10	0	0	0	40	35	0
15-16	0	0	0	5	30	24	0
17	0	0	0	23	35	25	0

O levantamento de campo mostrou uma importante perda de contato com os rolos superiores ao longo da rota do transportador tubular, conforme apresentado na Tabela 6 e no Apêndice C, o que compromete significativamente a capacidade de manter a operação estável da correia, favorecendo o derramamento de material e a rotação da correia [12,92,123]. Esses achados sugeriram que a rigidez transversal da correia tubular foi significativamente reduzida em relação ao valor calculado inicialmente (condição nominal). Assim, determinou-se a vida útil remanescente da correia nessa aplicação, utilizando a razão entre a vida útil acumulada desde a última substituição (57 meses) e a vida nominal estimada (72 meses), resultando em 21% de vida útil remanescente. A Figura 26 (a–b) apresenta os gráficos de radar do torque de retenção calculado para o cenário atualizado.

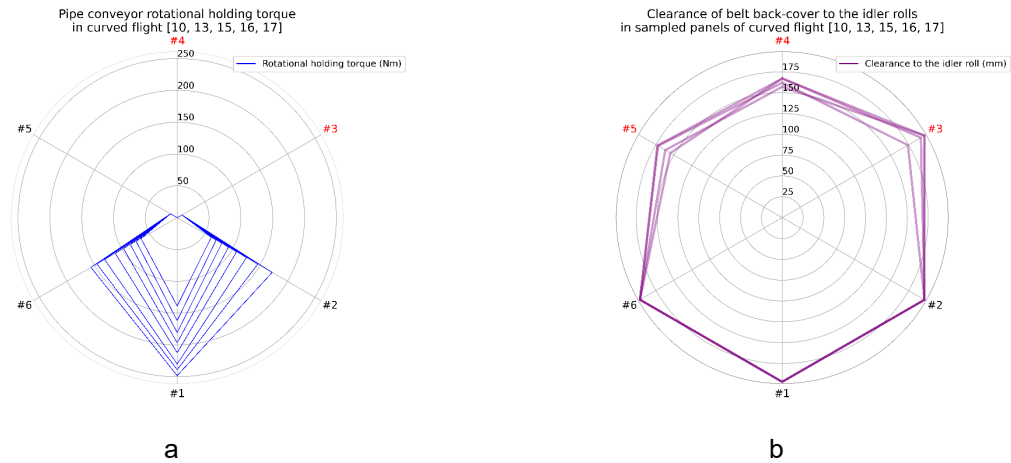


Figura 26. (a) Torque de retenção nos segmentos curvos 10, 13, 15, 16 e 17 com perda de contato nas posições 3 e 4 dos rolos; (b) distância entre a correia e os rolos dos segmentos curvos 10, 13, 15, 16 e 17 considerando a vida útil remanescente da correia, com perda de contato nas posições 3, 4 e 5 dos rolos [5].

Os resultados calculados (Figura 26a) são consistentes com a perda de contato observada na inspeção de campo (Figura 26b) causada pelo envelhecimento natural da borracha da correia, a interação entre a correia e o sólido a granel, a propagação de fissuras nas coberturas da correia e a fadiga da correia devido aos ciclos repetitivos de abertura e fechamento [138,139]. Após a verificação do histórico operacional do equipamento, constatou-se que a adição de massa ao contrapeso, durante o período de acomodação (acamamento) após a substituição da correia, contribuiu para reduzir sua força de formação ( $v_1$  na Equação (17)). Isso justifica as perdas de contato observadas nos segmentos fechados e concorda com os achados de CHEREDNIK [148], que estudou os efeitos da tensão longitudinal em transportadores tubulares. Esse cenário também favoreceu a ocorrência de desalinhamento fantasma da correia, devido às forças de contato concentradas nos rolos inferiores, combinadas à oscilação do centro de gravidade da formação tubular [6]. A análise das forças de contato nominais da correia sugere que o segmento curvo 15–16 impôs tensões adicionais na correia através da posição 5 do painel de rolos, potencialmente levando à sobretensão

localizada [28,119], que é um fator contribuinte importante para reduzir a força de formação da correia a longo prazo, juntamente com o aumento da tensão de esticamento da correia.

Com base na metodologia proposta e nas análises complementares realizadas, concluiu-se que a combinação dos fatores causais, decorrentes da redução da rigidez transversal da correia e do aumento de sua tensão longitudinal, foi a causa raiz do modo de falha da rotação persistente da correia no transportar tubular selecionado. Ademais, o aumento das forças de contato no segmento 15–16, nos estágios iniciais da vida útil da correia, foi um fator contribuinte. Como plano de ação corretiva, recomendou-se reduzir a tensão de esticamento ao valor mínimo necessário para manter o atrito apropriado no tambor motriz ( $v_1$  na Equação (17)). Além disso, recomendou-se a substituição da correia existente e o ajuste de sua vida útil para essa aplicação em modo contingencial, minimizando riscos de interrupção para a unidade operacional ( $\tau$  na Equação (17)). Utilizando os resultados resumidos da aplicação e o suplemento Solver de análise de hipóteses do Microsoft Excel, calculou-se a vida útil recomendada para o grau médio de enchimento operacional. Para isso, calculou-se a vida útil remanescente da correia para a qual a força de contato no rolo superior de um painel fechado corresponda a 5% da força de contato na posição inferior, conforme apresentado na Tabela 7. Recomendou-se a realização de uma análise de custo-benefício para a adoção desse plano de substituição semestral (26,73 meses), considerando o apetite ao risco da unidade operacional e o custo total de propriedade, ao contabilizar o impacto desse modo de falha na geração de valor para as partes interessadas, internas e externas, da organização.

Tabela 7. Vida útil proposta para a substituição da correia tubular com base na avaliação das forças de contato [5].

<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Grau de enchimento médio por lote $\psi$ [%]	40,00
Força de contato no rolo inferior F1 [N]	824,35
Força de contato no rolo superior F4 equivalente a 5% de F1 [N]	41,22
Vida remanescente por análise de hipóteses $\tau$ [%]	62,88
Vida útil estimada da correia tubular [meses]	72,00
Vida útil proposta para a substituição da correia tubular [meses]	26,73

Como plano de ação preventiva, recomendaram-se alterações no projeto das propriedades da correia, com a aplicação de métodos de teste em amostras da correia, combinados com análises acopladas pelos MEF e MED. As interações químicas [6,116] entre o carvão betuminoso e a cobertura superior da correia, bem como a degradação por intempéries durante paradas sazonais prolongadas, aceleram o envelhecimento da correia, principalmente ao aumentar sua dureza. Portanto, recomendou-se a adoção de correias resistentes a produtos químicos, ozônio e radiação ultravioleta, além da aplicação de métodos de teste em conformidade com as seguintes normas:

- ISO 703:2017 *Conveyor belts – Transverse flexibility (troughability) – Test method* [103];
- ISO 188:2023 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Accelerated ageing and heat resistance tests* [104];
- ISO 1431-1:2022 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Resistance to ozone cracking – Part 1: Static and dynamic strain testing* [90];
- ISO 1817:2022 *Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of the effect of liquids* [93];

- ISO 6943:2017 *Rubber, vulcanized – Determination of tension fatigue* (em português: Borracha vulcanizada – Determinação da fadiga por tensão) [105];
- ISO 27727:2008 *Rubber, vulcanized – Measurement of fatigue crack growth rate* [106];
- ISO/TR 7620:2005 *Rubber materials – Chemical resistance* (em português: Materiais de borracha – Resistência química) [176].

## 2.7. CONCLUSÕES

Analizou-se o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares e propôs-se um modelo para cálculo de um índice de estabilidade *OSI* considerando o momento rotacional da correia e o torque de retenção. Para o torque de retenção, considerou-se um segmento reto teórico equivalente de um transportador tubular curvo para calcular a distribuição ótima das forças de contato. Assim, estabeleceu-se um parâmetro de referência para avaliar a tendência de rotação decorrente de variações na rigidez transversal da correia ou em sua tensão longitudinal. O modelo proposto considera um conjunto valioso de parâmetros do equipamento, incluindo a vida útil remanescente da correia. A linearização permite a implementação simplificada e econômica do método. Isso é relevante para garantir benefícios sustentáveis dessa solução, bem como fases de comissionamento e de operação mais estáveis utilizando transportadores tubulares. Espera-se, dessa forma, que esse modelo suporte os processos de tomada de decisão tanto para as equipes operacionais quanto para as de manutenção. Além disso, esse método oferece uma ferramenta de avaliação facilitada para as fases iniciais do projeto, suportando análises de custo-benefício ao considerar as variações esperadas nas fases posteriores do ciclo de vida do equipamento.

Implementou-se a metodologia proposta em um estudo de caso de um transportador tubular de curta distância utilizado em um sistema de manuseio de carvão mineral, no qual a rotação da correia no segmento de carga é um modo de falha persistente. Utilizando uma aplicação em Python, avaliaram-se as perdas de contato nos segmentos curvos e calcularam-se seus índices de estabilidade de sobreposição, com base em dados amostrados a cada cinco

minutos durante a operação de manuseio de um lote unitário. Concluiu-se, então, que a combinação dos fatores causais, devido à redução da rigidez transversal da correia e ao aumento de sua tensão longitudinal, foi a causa raiz do modo de falha da rotação persistente no estudo de caso. Além disso, o aumento das forças de contato nos estágios iniciais da vida útil da correia foi um fator contribuinte. Por fim, propuseram-se planos de ações corretivas e preventivas, considerando a recomendação do intervalo de substituição da correia em modo contingencial e a adoção de alterações de projeto de acordo com as normas pertinentes.

As limitações desse estudo incluem a adoção de forças de contato por meio de simulações computacionais para determinar o momento rotacional da correia. Em estudos futuros, abordagens experimentais para medir as forças de contato, por exemplo, com o uso de extensômetros, devem ser consideradas para fornecer informações para o cálculo do momento rotacional da correia, como os estudos de medição das forças de contato desenvolvidos na Universidade Técnica de Košice [10,11,19-26,150]. Dessa forma, os índices de estabilidade poderão ser processados em tempo real, o que permitirá avanços no uso de gêmeos digitais, conforme proposto por FEDORKO *et al.* [47], ou viabilizará aplicações de inteligência artificial em computação de borda, conforme proposto por KLIPPEL *et al.* [51].

## CAPÍTULO 3

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da posição de sobreposição da correia em um transportador tubular, utilizando gêmeos digitais, Internet Industrial das Coisas e modelos de linguagem autorregressivos, por meio de uma bancada de testes e uma amostra de correia de um transportador tubular de longa distância, comissionado e operacional. O texto é uma tradução não oficial da publicação de DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [36] e contém ajustes gramaticais e descritivos para adequação à língua portuguesa, sem alteração do conteúdo e da mensagem original.

#### 3.1. TÍTULO DA PUBLICAÇÃO

Rotação da correia em transportadores tubulares: Desenvolvimento de um sistema de monitoramento da posição de sobreposição utilizando gêmeos digitais, Internet Industrial das Coisas e modelos de linguagem autorregressivos.

#### 3.2. RESUMO DO CAPÍTULO

A rotação da correia é um modo de falha crítico em transportadores tubulares. No entanto, o monitoramento da posição de sobreposição permanece inexplorado. As soluções de monitoramento existentes apresentam custos elevados e carecem de escalabilidade, baseando-se principalmente na detecção de variações angulares que ultrapassam limites predefinidos. Desenvolveu-se um gêmeo digital, por meio de um equipamento de teste de baixo custo, para mensurar a rotação da correia, utilizando prototipagem 3D, sensores infravermelhos de distância e um acelerômetro de 3 eixos. Implementou-se uma rede de Internet Industrial das Coisas em arquitetura controlador-respondente, utilizando o protocolo ESP-NOW. Aplicando a mínima solicitação viável, treinou-se um modelo de linguagem autorregressivo para prever a posição de sobreposição. Em seguida, desenvolveu-se um

programa para computação em nuvem e para armazenamento local de medições. Além disso, desenvolveu-se uma interface homem-máquina para aplicações futuras em contextos reais. O viés e a precisão da medição para o ângulo de sobreposição ( $0,2294 \pm 11,8822^\circ$ ), velocidade angular ( $0,1630 \pm 0,7344$  rpm), número absoluto de rotações ( $0,0001336 \pm 0,0448$  rotações), diâmetro ( $-0,1984 \pm 6,3743$  mm) e posição da borda externa (conformidade de 100%) apresentaram-se adequados para o uso pretendido.

### 3.3. INTRODUÇÃO

Experiências práticas têm demonstrado que múltiplas causas e fatores contribuintes podem desencadear a rotação da correia em transportadores tubulares. Esses fatores incluem condições ambientais, paradas sazonais prolongadas, propriedades da correia ou granel sólido, erros de projeto ou implementação, práticas de operação e manutenção inadequadas ou omissivas, entre outros fatores [5,89]. Além disso, o movimento repetitivo de flexão da correia ao longo do tempo reduz sua rigidez transversal e a resistência ao rolamento por indentação, resultando em perdas de contato prováveis entre a correia e os rolos superiores dos painéis fechados [91]. Essas condições levam à rotação da correia, que pode ocorrer nos segmentos de carga ou de retorno do transportador. Mudanças na posição de sobreposição também podem ocorrer em curtas distâncias e em velocidades angulares relativamente altas, resultando em múltiplas rotações da correia ao longo da rota do transportador. A Figura 27 (a–d) apresenta um evento de rotação crítica em uma correia tubular, envolvendo múltiplas rotações em curta distância.

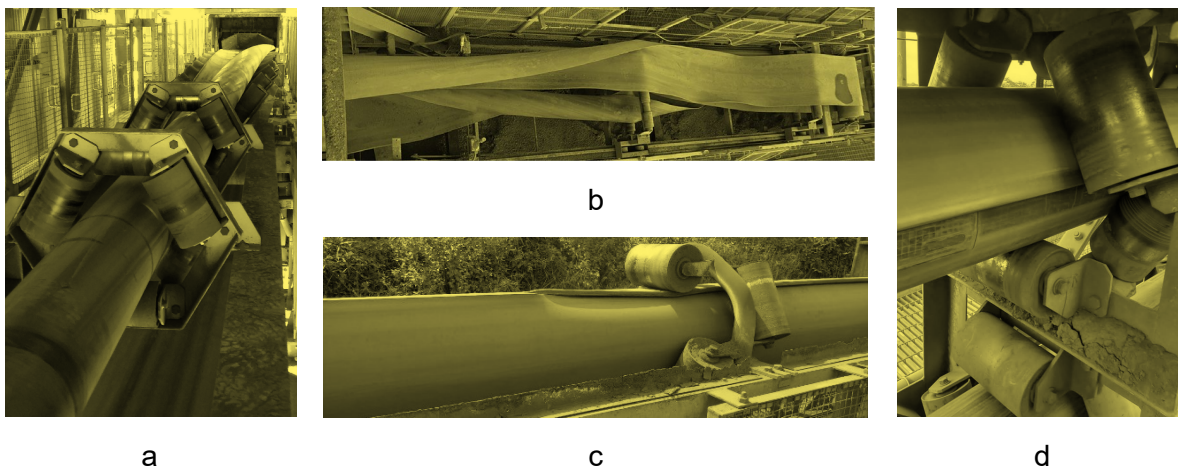


Figura 27. Múltiplas rotações da correia tubular em curta distância: (a) zona de transição na estação de descarga; (b) torção na estação de esticamento; (c) alternância das bordas de sobreposição; e (d) diâmetro reduzido da formação tubular [36].

Após uma extensa revisão das principais publicações nas maiores bases de dados de resumos e citações relacionadas a esse tópico, concluiu-se que o monitoramento da posição de sobreposição em correias tubulares permanece inexplorado nas pesquisas publicadas. Nesse estudo, projetou-se e desenvolveu-se um gêmeo digital por meio de um equipamento de teste de baixo custo para mensurar a rotação de uma amostra de correia tubular, utilizando prototipagem tridimensional (3D), sensores infravermelhos de distância e um acelerômetro de 3 eixos. Além disso, implementou-se uma rede de Internet Industrial das Coisas (em inglês: *Industrial Internet of Things – IIoT*) em arquitetura controlador-respondente, com módulos ESP32 e componentes eletrônicos do tipo sistema em um chip (em inglês: *System-on-Chips – SoCs*), que utilizaram o protocolo de comunicação sem fio ESP-NOW. Desenvolveu-se um programa em Python e ajustou-se um modelo de linguagem autorregressivo, com inteligência artificial generativa, para prever o ângulo de sobreposição da correia. Para isso, os dados de treinamento e de amostragem foram historicizados localmente e utilizaram-se recursos de computação em nuvem no servidor da empresa OpenAI. Uma interface homem-máquina (IHM) também foi desenvolvida para futuras aplicações em casos reais, fornecendo ao operador da interface informações codificadas por cores, juntamente com os seguintes

parâmetros operacionais: ângulo de sobreposição ( $0^\circ$  a  $359,99^\circ$ ), velocidade angular (em rpm), número absoluto de rotações, diâmetro da correia tubular (em mm) e posição da borda externa da correia (indefinida, esquerda ou direita).

### 3.4. MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura funcional desse projeto consistiu na medição de parâmetros-chave relacionados à posição de sobreposição da correia de um transportador tubular e compreendeu as seguintes subfunções: aquisição de dados, transmissão sem fio, processamento e armazenamento de dados, treinamento do modelo, computação em nuvem e interface homem-máquina. Em seguida, selecionou-se um transportador tubular de longa distância, comissionado e operacional, como equipamento de referência, do qual foi coletada uma amostra de 500 mm de sua correia sobressalente para projetar um equipamento de teste. A Tabela 8 lista os dados básicos do projeto do transportador de referência e a Figura 28 apresenta sua vista superior juntamente com o perfil de elevação do terreno.

Tabela 8. Dados básicos de projeto do transportador de referência [36].

Parâmetro	Unidade	Valor
Granel sólido	-	Carvão betuminoso
Densidade do granel sólido	kg/m <sup>3</sup>	881,00
Capacidade de projeto	ton/h	1.000,00
Comprimento desenvolvido	m	4.283,00
Curvas horizontais	unidades	14,00
Espaçamento entre painéis fechados	m	2,00
Posição da borda externa de sobreposição	Esquerda ou Direita	Direita
Diâmetro externo da formação tubular	mm	420,00
Diâmetro nominal da formação tubular	mm	375,00
Largura da correia	m	1,50
Espessura da correia tubular	mm	22,00
Massa linear da correia tubular	kg/m	45,60
Velocidade escalar da correia	m/s	4,90

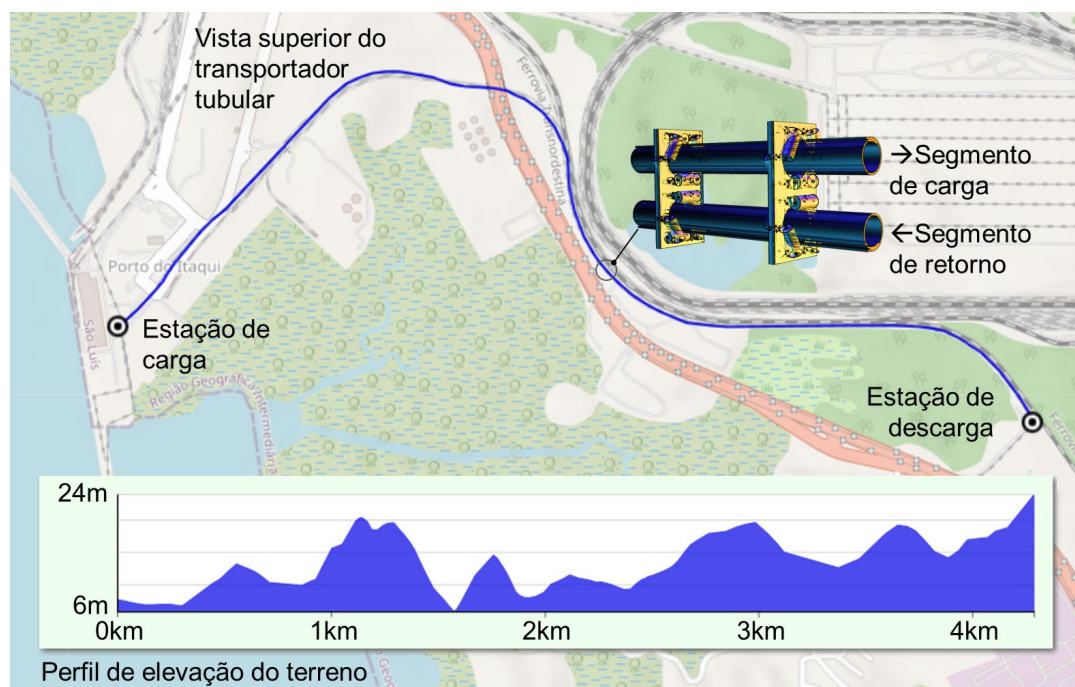


Figura 28. Vista superior do transportador tubular de referência e perfil de elevação do terreno [36].

### 3.4.1. Aquisição de dados

A primeira etapa no desenvolvimento do sistema de medição consistiu em criar um modelo CAD (do inglês: *Computer-Aided Design*) 3D de um segmento do transportador de referência para analisar as restrições físicas à montagem de uma unidade de medição em uma aplicação real. Com base nisso, projetou-se um módulo circular de seção transversal elíptica para impressão 3D. Após um estudo dimensional que determinou uma distância média permitida de 130 mm entre a cobertura de retorno da correia e a unidade de medição, selecionou-se o sensor de distância infravermelho Sharp GP2Y0E03, cuja faixa de medição é de 40 a 500 mm. Em seguida, o módulo circular foi dividido em 16 seções de dimensões iguais, cada uma com um encaixe fêmea para a montagem de um sensor. A seção transversal vazada do módulo circular permitiu a passagem da fiação elétrica, dividida em dois circuitos, agrupados por prensa-cabo. A Figura 29 (a-l) mostra as etapas para projetar a unidade de medição, por meio da modelagem do transportador de referência.

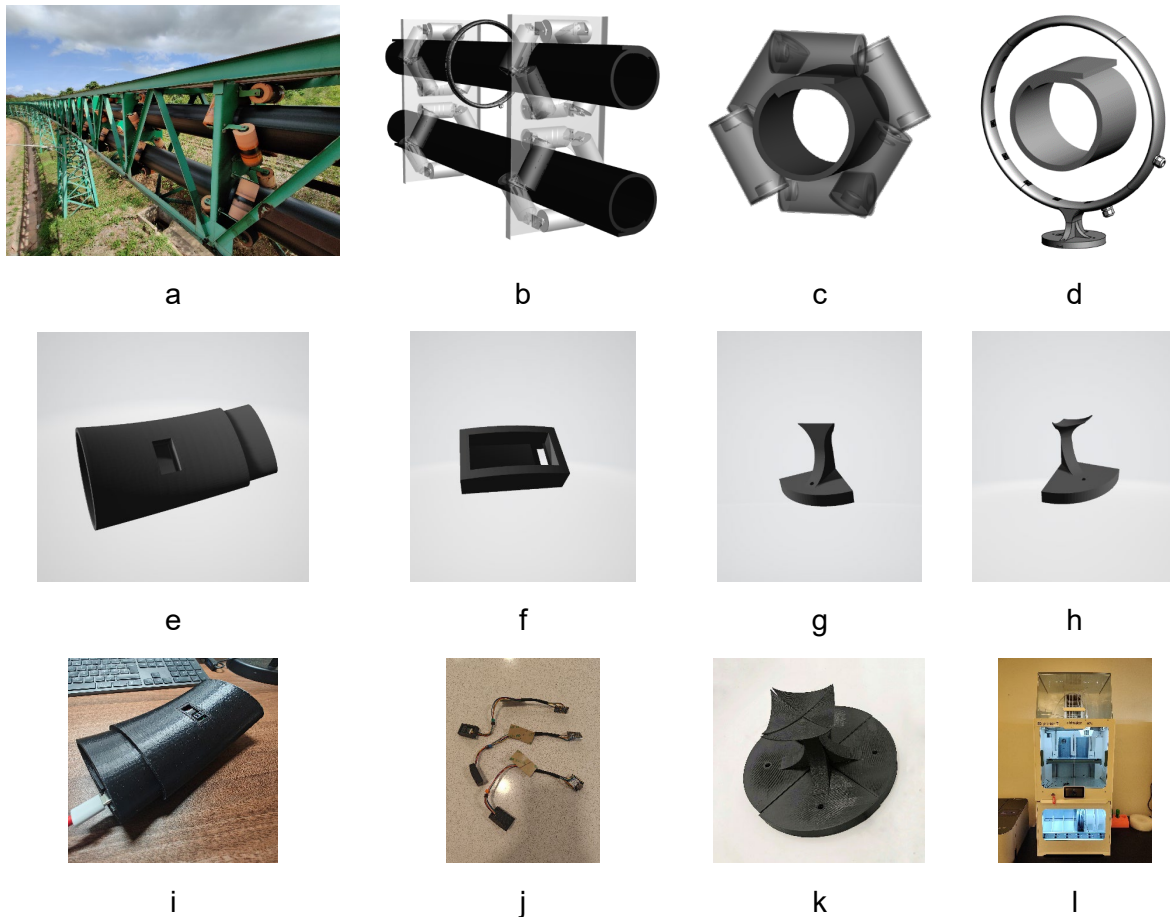


Figura 29. Projeto conceitual da unidade de medição: (a) vista real do transportador tubular de referência; (b) modelo 3D de um segmento do transportador; (c) modelo 3D da seção da correia; (d) modelo 3D da unidade de medição; peças modulares para prototipagem: (e), (i) seção individual do módulo circular; (f), (j) invólucro para sensor infravermelho de distância; (g), (h), (k) suporte de montagem da unidade de medição; e (l) processo de impressão 3D [36].

A etapa seguinte consistiu em projetar nichos hexagonais de madeira para confinar uma amostra de correia de 500 mm em formato tubular, reproduzindo as distâncias equivalentes às dos rolos em um painel fechado típico do transportador tubular de referência. Esse conjunto podia girar livremente por meio de uma alavanca manual e de rolamentos, permitindo ao usuário do equipamento de teste reproduzir a rotação da correia. Contrapesos mantiveram a posição de sobreposição padrão em 0°, e uma alavanca de frenagem manual foi incluída para

ajustar diferentes posições angulares, conforme necessário. Ganchos de metal estabilizaram a formação tubular da amostra de correia, mantendo constante o comprimento da sobreposição. Além disso, fixaram-se escalas graduadas de 360° em cada nicho de madeira, como referência visual. Anexou-se também um acelerômetro de 3 eixos, modelo InvenSense GY-521 MPU-6050, a um dos nichos de madeira para medir o ângulo da posição de sobreposição.

Selecionaram-se, então, as plataformas de prototipagem eletrônica IloT Seeed Studio XIAO ESP32C3 para aquisição de dados, conectadas aos sensores infravermelhos de distância e ao acelerômetro de 3 eixos por meio de suas interfaces seriais I2C. Utilizando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE 2.1.0, programou-se cada um dos 17 módulos de rede (16 para medição de distância e 1 para medição de posição angular) para gerar cadeias de caracteres no formato "id00:000.00", concatenando o identificador de cada nó de rede ao seu valor mensurado correspondente (um número em ponto flutuante de 2 dígitos), para uso posterior no modelo de linguagem autorregressivo (id01 a id17). Além disso, criaram-se duas variáveis adicionais no módulo 17 para calcular a velocidade angular em rpm (id18) e o número absoluto de rotações a partir da posição 0° (id19), assumindo-se valores positivos para a rotação da correia no sentido horário, na direção do fluxo do material manuseado.

Finalmente montou-se a bancada de testes, fornecendo um gêmeo digital da geometria da correia tubular. Fixou-se a unidade de medição a uma plataforma móvel e conectou-se o conjunto rotativo por meio de dois suportes telescópicos. Utilizaram-se cabos USB-A para USB-C para alimentar os módulos IloT conectados a dois concentradores USB de 10 portas, cada um com oito dispositivos conectados (circuitos id01 a id08 e id09 a id16). Utilizou-se um banco de baterias portátil de 10.000 mAh, acoplado ao conjunto rotativo, para alimentar o acelerômetro de 3 eixos (id17). A Figura 30 apresenta a bancada de testes e seus principais componentes.



Figura 30. Bancada de testes e seus principais componentes [36].

### 3.4.2. Transmissão sem fio

Implementou-se uma rede do tipo controlador-respondente, com módulos ESP32, para transmitir os dados adquiridos por meio do protocolo de comunicação sem fio ESP-NOW. Cada XIAO ESP32C3 foi configurado como um módulo respondente (nós de rede 1 a 17). Especificou-se, então, o módulo controlador como um LILYGO® T-Dongle-S3 ESP32-S3, uma plataforma de prototipagem eletrônica compatível com o protocolo ESP-NOW, alojada em um

dispositivo USB, para posterior processamento e armazenamento de dados quando conectado a um computador. No ambiente de desenvolvimento Arduino IDE 2.1.0, utilizou-se a biblioteca QuickESPNow v0.8.1 [177] para criar uma comunicação controlador-respondente, configurando o módulo controlador para enviar uma solicitação a cada 20 ms a todos os dispositivos em monitoramento no mesmo canal. A mensagem de solicitação consistiu em um número inteiro, obtido por meio de um laço iterativo (de 1 a 17), com cada módulo respondente solicitado sequencialmente. Para cada solicitação, o módulo 17 enviou ao controlador as medições id17, id18 e id19.

Para implementar essa rede IIoT, foram inicializadas as seguintes funções na configuração de cada dispositivo: *quickEspNow.begin*, *quickEspNow.onDataSent* e *quickEspNow.onDataRcvd*. A função *begin* inicializou a comunicação via ESP-NOW nos dispositivos de rede. A função assíncrona *onDataSent* retornou o valor booleano verdadeiro quando os dados foram enviados. Utilizou-se essa função para definir uma variável binária após cada transmissão de dados, viabilizando o envio do pacote de dados consecutivo. A função de retorno de chamada *onDataRcvd* foi utilizada para receber dados dos dispositivos de rede; no módulo controlador, utilizou-se essa função para receber as cadeias de caracteres e alocar as leituras de medição em um objeto de notação em *JavaScript* (em inglês: *JavaScript Object Notation – JSON*) de 19 elementos, criado com a biblioteca *ArduinoJson* 6.21.2. Em seguida, transmitiram-se as cadeias de caracteres JSON pela porta serial do módulo controlador para posterior processamento e armazenamento de dados. Nos módulos respondentes, utilizou-se essa função para receber a solicitação do controlador de rede: um número inteiro entre 1 e 17. Aplicou-se uma instrução condicional para verificar, em cada módulo respondente, se o número inteiro recebido correspondeu ao seu nó predefinido e se o endereço de controle de acesso à mídia (em inglês: *Media Access Control, MAC*) recebido

correspondeu ao do controlador. Em seguida, definiu-se uma variável binária para autenticação.

Na função de laço principal de cada dispositivo IIoT, executou-se a função *quickEspNow.send* para enviar dados aos dispositivos em monitoramento, o que requer um endereço *MAC* de destino e um pacote de dados. No módulo controlador, utilizou-se essa função para enviar solicitações por difusão (em inglês: *broadcast calls*): um número inteiro de 1 a 17 para todos os dispositivos em monitoramento, definindo a propriedade *DEST\_ADDR* (endereço de destino) para *ESPNOW\_BROADCAST\_ADDRESS* (solicitação por difusão). Nos módulos respondentes, utilizou-se essa função para enviar as leituras de medição (cadeias de caracteres no formato "id00:000.00") em chamadas unidirecionais (em inglês: *unicast calls*), definindo a propriedade *DEST\_ADDR* com o endereço *MAC* do controlador. Essa abordagem garantiu que os módulos respondentes transmitissem periodicamente, de modo unidirecional, quando solicitados pelo endereço *MAC* predefinido do controlador, sem gerar conflitos entre os nós respondentes na rede IIoT. Na camada física, a biblioteca Wire (vinculada ao Arduino IDE 2.1.0) permitiu a comunicação entre dispositivos de rede IIoT e as interfaces seriais I2C dos dispositivos de medição.

A Tabela 9 apresenta a lista de variáveis utilizadas na rede ESP-NOW. Após receber uma solicitação, cada módulo respondente enviou a cadeia de caracteres no formato "id00:000.00" de volta à rede, destinada ao endereço *MAC* do controlador. O módulo controlador, então, recebeu as mensagens de texto, dividiu as respostas entre o identificador do módulo ("id00") e seu valor em ponto flutuante correspondente ("000.00") e alocou o par em sua variável JSON de 19 elementos. A Figura 31 ilustra a configuração da rede para esse sistema de medição.

Tabela 9. Lista de variáveis utilizadas na rede IIoT [36].

Variável	Dados	Camada	Aquisição	Processamento	Dependência
id01	distância	física	medição		-
id02	distância	física	medição		-
id03	distância	física	medição		-
id04	distância	física	medição		-
id05	distância	física	medição		-
id06	distância	física	medição		-
id07	distância	física	medição		-
id08	distância	física	medição	Sensor infravermelho de distância	-
id09	distância	física	medição		-
id10	distância	física	medição		-
id11	distância	física	medição		-
id12	distância	física	medição		-
id13	distância	física	medição		-
id14	distância	física	medição		-
id15	distância	física	medição		-
id16	distância	física	medição		-
id17	ângulo	física	medição	Acelerômetro	-
id18	velocidade angular	física	medição	Giroscópio	-
id19	rotações	física	cálculo	Dispositivo IIoT	id17
id20	diâmetro	aplicação	cálculo	Python	id01 a id16
id21	posição da borda ext.	aplicação	cálculo	Python	id01 a id16, id17 ou id22
id22	ângulo	nuvem	predição	OpenAI	id01 a id16
id23	velocidade angular	aplicação	cálculo	Python	id22
id24	rotações	aplicação	cálculo	Python	id22
<i>timestamp</i>	data e hora	aplicação	cálculo	Python	-
<i>prompt</i>	texto	aplicação	cálculo	Python	id01 a id16
<i>completion</i>	texto	aplicação	cálculo	Python	id17
<i>tokens</i>	contagem	nuvem	cálculo	OpenAI	id01 a id16, id22

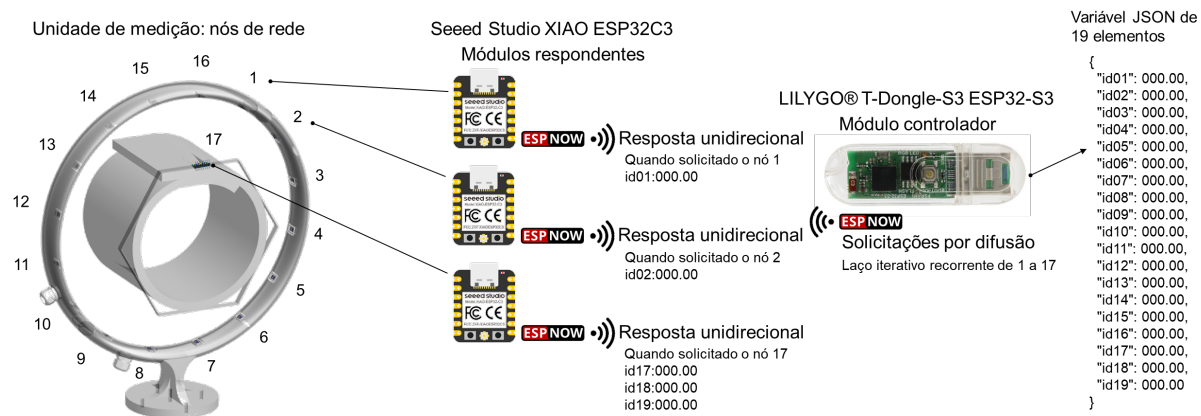


Figura 31. Configuração de rede controlador-respondente [36].

### 3.4.3. Processamento e armazenamento de dados

Desenvolveu-se um programa de computador em Python, no ambiente de desenvolvimento IDLE 3.10.8, para processar e historicizar as cadeias de caracteres codificadas em JSON recebidas do módulo controlador LILYGO® T-Dongle-S3 ESP32-S3, utilizando a biblioteca Orjson 3.9.9 e a comunicação via porta serial. Para compensar eventuais diferenças de concentricidade entre o conjunto rotativo e a unidade de medição, aplicou-se um ajuste linear nas medições de distância (id01 a id16) para obter valores mínimos e máximos entre 130 e 170 mm, que foram então subtraídos do valor do raio do módulo circular (igual a 337,5 milímetros) para indicar a distância entre o centro da unidade medição e a cobertura de retorno da amostra de correia. Criaram-se duas variáveis adicionais na camada de aplicação para calcular o diâmetro da correia (id20) e a posição da borda externa (id21). Calculou-se a primeira variável como a média das medições de distância (id01 a id16) multiplicada por um fator de ajuste baseado nas medições de campo (definido como 1,16 para esse estudo de caso). A segunda variável foi determinada pela comparação entre as duas somas de oito medições de distância adjacentes, nas direções antihorária e horária, do ângulo atual (id17

ou id22). Com isso, atribuíram-se três valores distintos a essa variável: 0,00 (borda externa indefinida), 1,00 (borda externa do lado direito) ou 2,00 (borda externa do lado esquerdo).

Em seguida, criou-se um dicionário de dados e registrou-se cada medição em um arquivo CSV, incluindo um rótulo com a data e a hora da medição, bem como um conjunto de variáveis reservadas ao modelo de linguagem autorregressivo. A primeira variável adicional foi o ângulo de sobreposição previsto (id22), seguida da velocidade angular (id23) e do número absoluto de rotações (id24). Além disso, criou-se uma variável para registrar a solicitação submetida ao modelo (variável *prompt*), outra para registrar o preenchimento de cada medição (variável *completion*) e a última para registrar o número de unidades de texto (em inglês: *tokens*) consumidas após uma requisição de previsão do ângulo de sobreposição (variável *tokens*). A Tabela 9 apresenta o conjunto de variáveis para o monitoramento da posição de sobreposição de uma correia tubular na unidade de medição proposta.

#### 3.4.4. Treinamento do modelo

Realizou-se a amostragem de um conjunto extenso de medições antes da etapa de treinamento do modelo de linguagem autorregressivo. Esse processo incluiu a simulação de tantos cenários de rotação quanto os práticos. Além disso, considerou-se a coleta de amostras em que alguns sensores registraram medições inconsistentes devido à elevada velocidade angular da amostra. Essa etapa consistiu em girar a amostra da correia diversas vezes, tanto no sentido horário quanto no antihorário, aguardando a estabilização em múltiplas posições. A velocidade angular variou de forma discreta e brusca ao longo desse processo. Na etapa de treinamento (também referida como ajuste fino), utilizou-se a interface de programação de aplicações (em inglês: *Application Programming Interface – API*) de treinamento da OpenAI para criar um modelo de linguagem autorregressivo customizado. Selecionou-se um dos

modelos mais acessíveis e atualizados à época, o modelo Babbage-002, que permitiu o uso do formato de pares solicitação-preenchimento (em inglês: *prompt-completion pairs*).

Os modelos de transformadores generativos pré-treinados GPT (em inglês: *Generative Pre-trained Transformers*) da OpenAI utilizam conjuntos massivos de dados, o que permite uma abordagem de aprendizagem em contexto. Isso implica que os usuários podem fornecer alguns exemplos dos resultados esperados para contextualizar e orientar a geração de conteúdo no modelo [178]. Cada valor do ângulo de sobreposição previsto pelo modelo ajustado exigiu uma requisição individual via *API*, contendo uma cadeia de caracteres de solicitação (prompt) composta pelas leituras concatenadas dos sensores de distância (id01 a id16). Nesse contexto, a conversão das cadeias de caracteres em unidades de texto (em inglês: *tokenization*) constituiu um processo de interesse para viabilizar a computação em nuvem com adequada relação custo-benefício; portanto, deliberou-se em aplicar a mínima solicitação viável para obter os resultados das previsões sem fornecer contexto adicional ao modelo de linguagem (sem utilizar as abordagens de aprendizado de poucos disparos – em inglês: *few-shots* – ou de disparo único – em inglês: *one-shot*). A Tabela 10 lista alguns exemplos de requisições para treinamento do modelo de linguagem customizado com dados amostrados na unidade de medição. Durante essa etapa, a cadeia de caracteres da variável de preenchimento (em inglês: *completion*) resultou da concatenação do rótulo “id22” e do valor numérico em ponto flutuante da medição id17 no formato “000.00”. Adotou-se a terminologia 'unidades de texto' em sentido amplo, abrangendo, de modo não restritivo, segmentos de texto e comandos utilizados nos modelos de linguagem. Isso inclui morfemas (unidades linguísticas indivisíveis com função lexical ou gramatical), fragmentos de texto, espaços, sinais de pontuação, caracteres especiais, símbolos ou a combinação destes. Também inclui comandos específicos utilizados nos modelos de linguagem, como os de início e fim de sequência de texto, os de controle do fluxo de mensagens entre instruções, as entradas de texto do usuário e as saídas de texto geradas pelo modelo, entre outros.

Tabela 10. Exemplos de corpus rotulados amostrados na unidade de medição [36].

Solicitação	Preenchimento
id01:152.44,id02:152.72,id03:162.76,id04:156.62,id05:157.64,id06:157.90,id07:161.29,id08:155.13,id09:154.70,id10:155.45,id11:150.25,id12:157.72,id13:159.48,id14:165.95,id15:142.94,id16:145.23#	id22:0.24@
id01:147.27,id02:154.18,id03:158.39,id04:159.02,id05:159.54,id06:159.82,id07:160.78,id08:156.36,id09:156.08,id10:157.42,id11:153.68,id12:160.47,id13:158.97,id14:153.31,id15:153.03,id16:130.00#	id22:60.55@
id01:152.15,id02:154.37,id03:157.89,id04:163.07,id05:163.69,id06:132.08,id07:155.57,id08:159.23,id09:156.36,id10:158.36,id11:156.93,id12:160.63,id13:156.81,id14:162.30,id15:165.39,id16:161.24#	id22:180.65@
id01:153.79,id02:154.02,id03:163.48,id04:156.07,id05:159.13,id06:154.29,id07:162.61,id08:157.49,id09:153.23,id10:158.82,id11:153.85,id12:166.61,id13:157.17,id14:164.05,id15:159.69,id16:155.41#	id22:240.51@
id01:150.82,id02:153.74,id03:162.98,id04:157.72,id05:159.21,id06:163.43,id07:161.23,id08:154.31,id09:152.49,id10:156.20,id11:150.12,id12:160.30,id13:130.97,id14:146.08,id15:147.40,id16:160.79#	id22:330.73@
id01:149.95,id02:154.47,id03:164.26,id04:157.45,id05:159.71,id06:158.39,id07:161.87,id08:154.65,id09:155.85,id10:157.80,id11:148.74,id12:156.75,id13:159.41,id14:132.55,id15:144.16,id16:158.10#	id22:359.54@

Desenvolveu-se, então, um programa em Python no ambiente de desenvolvimento IDLE 3.10.8 para o ajuste fino do modelo de linguagem autorregressivo. Utilizou-se a biblioteca OpenAI 0.28.1 para submeter requisições via *API* de pares de solicitação-preenchimento (em inglês: *prompt-completion*) a partir dos dados historicizados em formato CSV. Ao historicizar os dados, adicionaram-se os caracteres especiais # e @ às cadeias de caracteres de solicitação-preenchimento, como sufixos e sequências de parada, para fins posteriores de computação em nuvem (Tabela 10). Em seguida, carregaram-se 5.021 amostras dos dados historicizados via *API* (utilizando as variáveis de solicitação e de preenchimento, conforme apresentado na Tabela 9), definindo o hiperparâmetro número de épocas igual a 4. Depois de gerar o modelo customizado, recuperaram-se as métricas de unidades de texto utilizadas (em

inglês: *trained tokens*), perdas (em inglês: *training loss*) e acurácia (em inglês: *training accuracy*) para análise e discussão posteriores.

#### 3.4.5. Computação em nuvem

Essa etapa consistiu na implementação da rede IIoT controlador-respondente, estabelecendo uma comunicação bidirecional entre o gêmeo digital e os servidores da OpenAI para prever o ângulo de sobreposição da amostra da correia. Criou-se uma função no ambiente de desenvolvimento do Python IDLE 3.10.8 para requisitar as tarefas de preenchimento utilizando a biblioteca OpenAI 0.28.1. Definiu-se a temperatura do modelo em 0,5 (controle de aleatoriedade), limitando o número máximo de unidades de texto por requisição a 200 (aproximadamente 4 unidades por caractere padrão do inglês), aplicando o valor 1 à melhor de N respostas (número de preenchimentos processados no servidor por requisição) e definindo o tempo limite de resposta em 2.000 ms. No caso de erros no processamento das requisições, sejam por perdas de comunicação na Internet, falhas nos servidores da OpenAI ou respostas generativas inconsistentes, os gerenciadores de erros do programa atribuíram a última leitura válida ao resultado da função. A resposta a cada requisição de preenchimento incluiu o ângulo de sobreposição e o número de unidades de texto utilizadas (com base na solicitação enviada e no preenchimento recebido). Após cada execução dessa função, atualizaram-se e historicizaram-se as variáveis reservadas para o modelo de linguagem autorregressivo (Tabela 9).

#### 3.4.6. Interface homem-máquina

Finalmente, desenvolveu-se uma IHM para aplicações futuras em casos reais, permitindo ao usuário do equipamento de teste reproduzir múltiplos cenários de rotação da correia por meio de uma tela interativa e intuitiva. A interface foi desenvolvida no ambiente de desenvolvimento Python IDLE 3.10.8 e utilizaram-se as bibliotecas Tkinter 8.6 e Threading (ambas vinculadas ao ambiente de desenvolvimento Python 3.10.8) para gerar uma janela composta pelos

botões *Start/Pause* (em português: Iniciar/Pausa), *GenAI processing* (em português: Processamento via IA generativa), *Logger* (em português: Registrador) e *Terminate* (em português: Terminar). Cada botão executou uma função específica sob demanda, permitindo ao usuário ativar ou desativar as requisições ao servidor da OpenAI e/ou o armazenamento de dados em arquivo CSV. Na inicialização, o programa verificou o caminho completo e o nome predefinido do arquivo CSV. Aplicou-se, então, uma instrução condicional para criar um arquivo, se não existente, ou atualizar o existente, se disponível. Codificaram-se os botões para permanecerem na cor vermelha caso o programa fosse pausado, o processamento via IA generativa ou o registro de dados fosse desabilitado, de forma independente. A Figura 32 (a–b) apresenta a janela de comando da IHM e o terminal de interface.

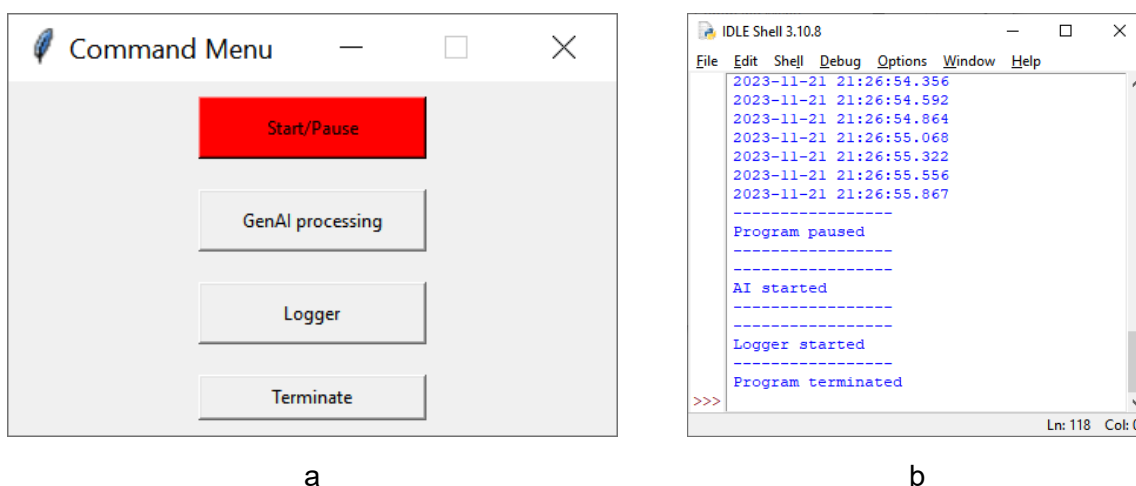


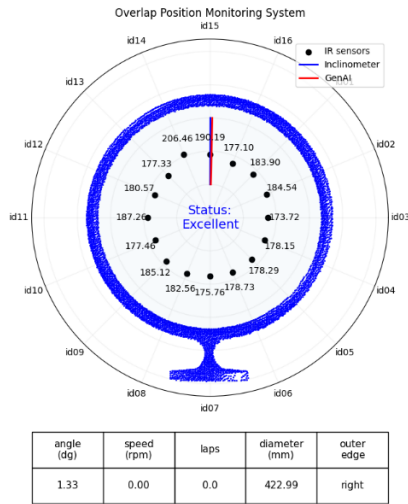
Figura 32. (a) janela de comando da IHM e (b) terminal de interface [36].

Adicionalmente, desenvolveu-se uma tela composta por um gráfico em coordenadas polares, ponteiros para os ângulos de sobreposição (mensurado pelo acelerômetro e previsto por IA generativa), uma nuvem de pontos bidimensionais (2D) representando o módulo de medição e uma tabela de dados com os seguintes parâmetros operacionais: ângulo de sobreposição ( $0^\circ$  a  $359,99^\circ$ ), velocidade angular (em rpm), número absoluto de rotações, diâmetro da formação tubular (em mm) e posição da borda externa da correia (indefinida, esquerda ou direita). A nuvem de pontos 2D foi criada por meio do módulo Image 9.0.1 da biblioteca Pillow

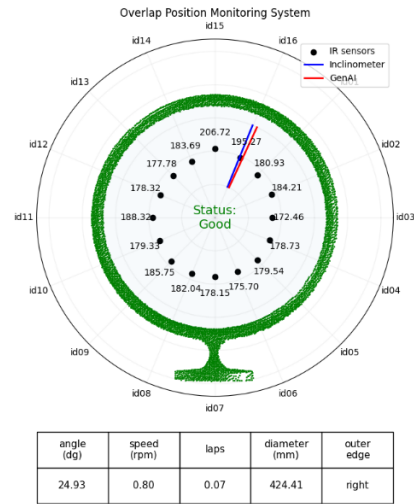
10.1.0, utilizando uma imagem PNG (em inglês: *portable network graphic*) do dispositivo. Utilizaram-se as bibliotecas Matplotlib 3.5.1 e NumPy versão 1.22.2 para criar o gráfico polar, os pontos de dados dos sensores infravermelhos de distância (id01 a id16), os ponteiros para os ângulos de sobreposição (id17 e id22) e a tabela de dados (id17 a id19 ao utilizar o inclinômetro ou id22 a id24 ao utilizar o processamento por IA generativa, além dos valores id20 e id21).

Também foi fornecido ao usuário um estado de integridade do ativo, com base no ângulo de sobreposição atual. O ponteiro do ângulo de sobreposição via inclinômetro foi exibido continuamente em azul, enquanto o ponteiro correspondente ao processamento por IA generativa foi exibido em vermelho quando habilitado. A Figura 33 (a–f) apresenta as condições de integridade do ativo com base no ângulo de sobreposição. O rótulo de estado do ativo e sua cor variaram de acordo com os seguintes critérios:

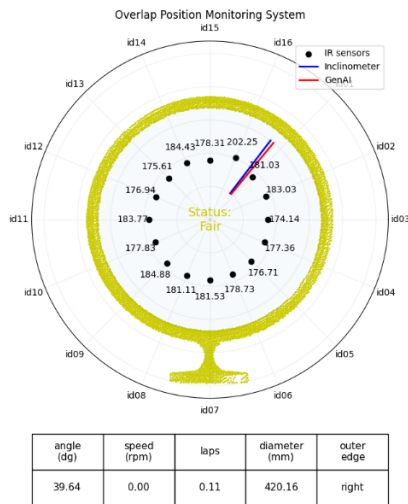
- Excelente (menos de 1/24 rotação em qualquer direção): cor azul;
- Boa (entre 1/24 e 1/12 rotações): cor verde;
- Regular (entre 1/12 e 1/8 rotações): cor amarela;
- Ruim (entre 1/8 e 1/4 rotações); cor laranja;
- Crítica (entre 1/4 e 1/2 rotações); cor vermelha;
- Falha potencial (mais de 1/2 rotação); cor marrom.



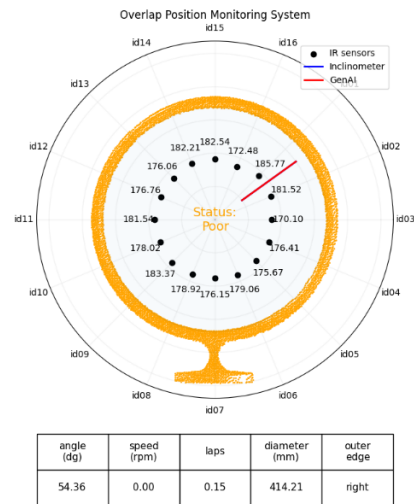
a



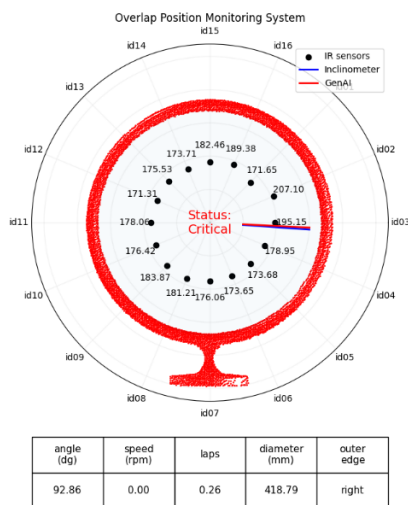
b



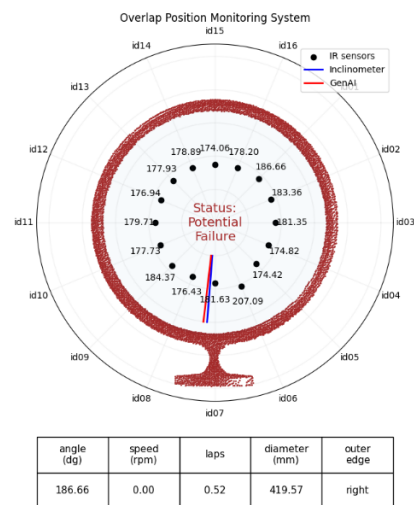
c



d



e



f

Figura 33. Integridade do ativo, codificada em cores, no gêmeo digital. Condição da correia com base no ângulo de sobreposição: (a) excelente – azul, (b) boa – verde, (c) regular – amarelo, (d) ruim – laranja, (e) crítica – vermelho e (f) falha potencial – marrom [36].

### 3.5. TEORIA E CÁLCULOS

Esta seção apresenta os princípios de medição aplicados ao desenvolvimento desse sistema de monitoramento, incluindo a arquitetura de rede para dispositivos IIoT, bem como detalhes sobre o ajuste fino do modelo de linguagem autorregressivo para previsão do ângulo de sobreposição da amostra da correia.

#### 3.5.1. Medição óptica ativa de distância

O sensor Sharp GP2Y0E03 é um transdutor óptico de distância ativo cujo princípio de medição é a triangulação. Esse sensor calcula a distância até um objeto reflexivo ao detectar a posição do ponto de luz refletido em seu sensor de imagem. No lado do emissor, um LED produz um feixe no espectro infravermelho, com faixa de comprimento de onda de  $850 \pm 70$  nm, e, em seguida, a posição do ponto de luz refletido é condensada no sensor de imagem CMOS (um detector óptico usando semicondutor de óxido metálico complementar; em inglês: *Complementary Metal Oxide Semiconductor*). A faixa nominal de detecção varia de 40 a 500 mm até o objeto refletivo, e o sensor está em conformidade com o protocolo de comunicação serial síncrono I2C como dispositivo periférico [179]. A Figura 34 ilustra o princípio de medição do sensor de distância infravermelho e seus principais componentes.

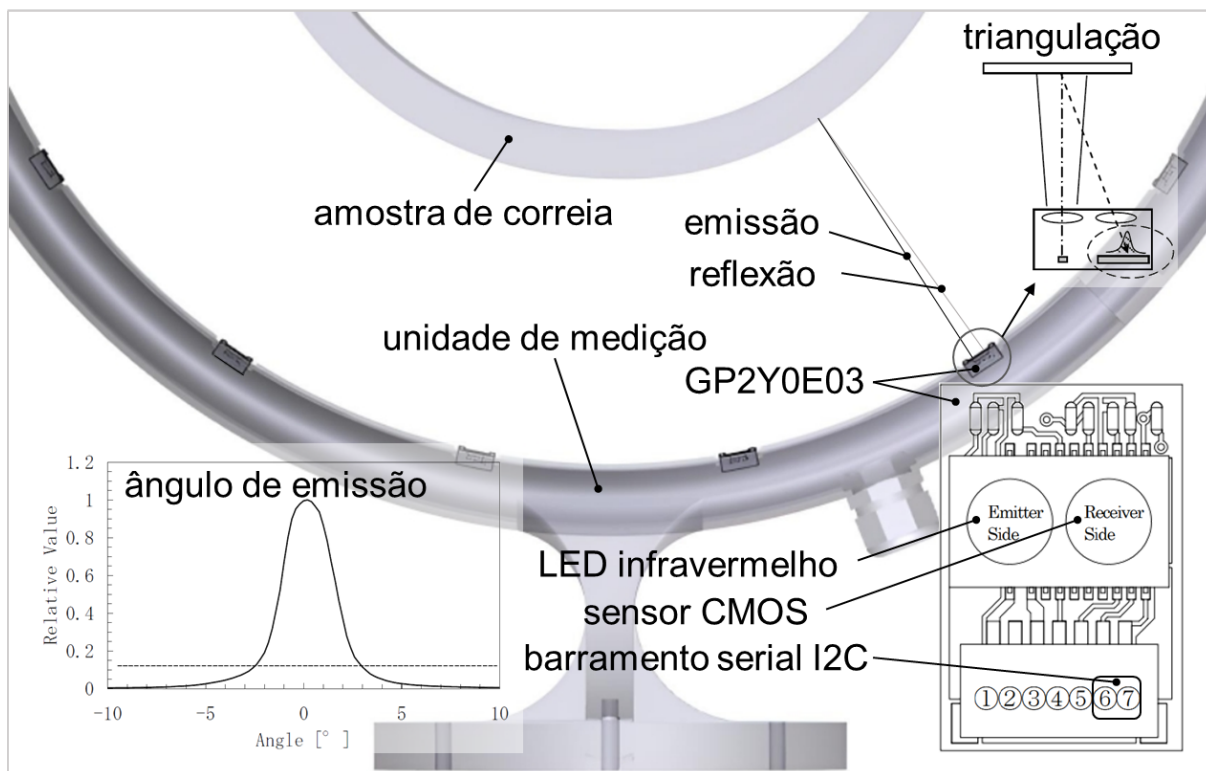


Figura 34. Princípio de medição e principais componentes do sensor GP2Y0E03 [36].

### 3.5.2. Detecção de movimento de 3 eixos

O sensor InvenSense GY-521 MPU-6050 é um transdutor de movimento de 3 eixos que integra um acelerômetro e giroscópio no mesmo circuito integrado, além de um sensor de temperatura. O acelerômetro é composto por capacitores duplos montados em um substrato de silício e configurados em sistema massa-mola. Uma massa inercial é utilizada como divisor de tensão no circuito desses capacitores. Portanto, qualquer aceleração altera a fase e amplitude do sinal de tensão de saída, permitindo determinar a direção e magnitude da aceleração. O giroscópio é composto por estruturas externas e internas, interligadas por molas. Um motor microeletrostático, contendo uma massa inercial em configuração massa-mola, induz a oscilação da estrutura interna. Um capacitor duplo é conectado à estrutura externa, com seu divisor de tensão conectado à estrutura interna. Devido ao efeito Coriolis que atua sobre a estrutura interna, qualquer rotação modifica a fase e a amplitude do sinal de

tensão de saída, permitindo determinar a taxa de rotação. A medição da aceleração nominal do sensor varia entre  $\pm 2$  e  $\pm 16$  g, e a da taxa de rotação entre  $\pm 250$  e  $\pm 2.000^\circ/\text{s}$ . O sensor está em conformidade com o protocolo de comunicação serial síncrono I2C, como dispositivo periférico [180]. A Figura 35 (a–c) ilustra o princípio de medição e a posição de montagem na unidade de medição.

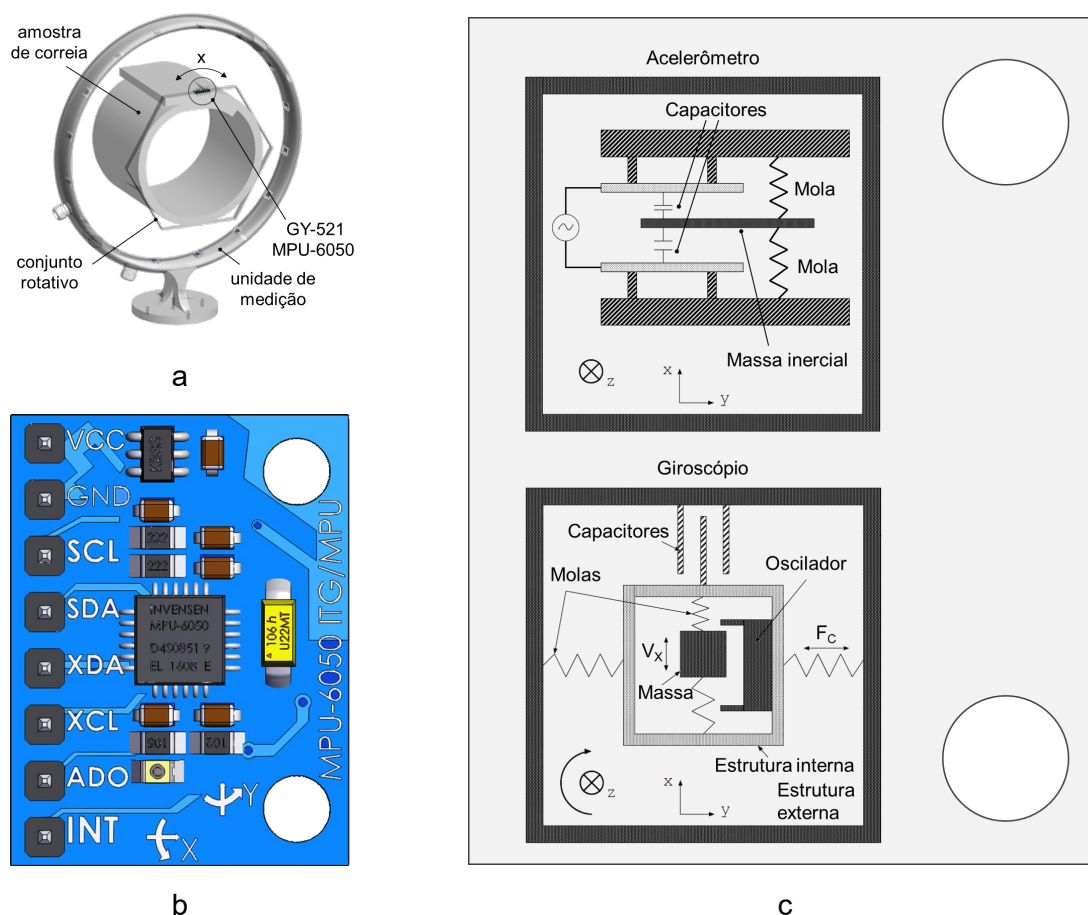


Figura 35. (a) Unidade de medição; (b) sensor GY-521 MPU-6050; (c) princípio de medição [36].

### 3.5.3. Comunicação sem fio não orientada à conexão

ESP-NOW é um protocolo de comunicação sem fio não orientado à conexão da Espressif, que combina funcionalidades de várias camadas do modelo de interconexão de sistemas abertos (em inglês: *Open Systems Interconnection – OSI*) em uma única camada de enlace. Na camada física, o protocolo é projetado para dispositivos IoT de baixo consumo de energia,

compatíveis com o padrão IEEE 802.11 para redes sem fio, e inclui um modo de operação de longo alcance para dispositivos ESP32 e ESP8266. Esse protocolo suporta as configurações de rede ponto-a-multiponto (em inglês: *one-to-many*) e multiponto-a-multiponto (em inglês: *many-to-many*), incluindo os modos de comunicação por difusão (em inglês: *broadcast*) e unidirecional (em inglês: *unicast*). Cada pacote de mensagem enviado por uma aplicação requer os endereços de controle de acesso à mídia MAC de origem e destino, e as colisões são gerenciadas utilizando o mecanismo padrão IEEE802.11 CSMA (acesso múltiplo com detecção de portadora; em inglês: *carrier sense multiple access – CSMA*). Quando o endereço MAC de destino é alterado para o nível alto em todos os bytes (0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF), o dispositivo de origem envia uma mensagem por difusão (um para todos). Esse protocolo permite a comunicação de dados em velocidades de 250 Kbit/s a 1 Mbit/s, com até 250 bytes por carga útil, dependendo da distância e interferência entre os dispositivos. Além disso, pode cobrir distâncias até 15 vezes maiores do que o Bluetooth de baixo consumo de energia (em inglês: *Bluetooth Low Energy – BLE*) [181-183].

Os microcontroladores ESP32-C3 e ESP32-S3 da Espressif são soluções integradas de baixo consumo de energia que suportam os protocolos Wi-Fi de 2,4 GHz e Bluetooth. Esses dispositivos possuem microprocessadores de alto desempenho, de um ou dois núcleos, operando a 160 e 240 MHz, respectivamente. As conexões Wi-Fi e Bluetooth compartilham a mesma antena do dispositivo por meio de um mecanismo interno de coexistência. A fonte de alimentação recomendada varia de 3,0 a 3,6 VDD (em inglês: *drain power voltage*), com 500 mA (3,3 VDD é o valor típico). Esses microcontroladores estão em conformidade com o protocolo de comunicação serial síncrono I2C, funcionando como dispositivos controladores ou periféricos [184-187].

As principais características da plataforma de prototipagem eletrônica Seeed Studio XIAO ESP32C3 incluem: suporte aos ambientes de desenvolvimento Arduino IDE e Micropython; consumo de energia ultrabaixo de 43  $\mu$ A em modo de hibernação; circuito de carregamento

de bateria integrado com suporte a baterias de lítio; 400 KB de memória volátil SRAM (em inglês: *static random-access memory*) e 4 MB de memória *flash* integrada (não-volátil); e múltiplas interfaces de conexão: 1 porta de comunicação serial I2C, 1 interface de comunicação serial SPI (em inglês: *Serial Peripheral Interface*), 2 portas UART (em inglês: *Universal asynchronous receiver-transmitter*) para comunicação serial assíncrona, 11 pinos de uso geral (em inglês: *general-purpose input/output – GPIO*) com suporte a modulação por largura de pulso (em inglês: *Pulse-width modulation – PWM*), 4 canais de conversão analógico-digital (em inglês: *Analog-to-digital converter – ADC*), 1 conexão padrão JTAG (em inglês: *Joint Test Action Group*) para depuração. Os principais recursos do dispositivo USB LILYGO® T-Dongle-S3 ESP32-S3 incluem: compatibilidade com os ambientes de desenvolvimento Arduino IDE, PlatformIO IDE e Micropython; 16 MB de memória *flash* (não-volátil), botão de inicialização e entrada para cartão TF (em inglês: *TransFlash*); e uma tela colorida opcional de 0,96 polegadas e 65 mil cores, com uma interface de comunicação serial SPI de 4 fios.

#### 3.5.4. Ajuste fino de modelos de linguagem autorregressivos

Um modelo autorregressivo prevê a variável de interesse com base em seus valores anteriores. No processamento de linguagem natural (PLN), esses modelos são pré-treinados e ajustados para prever a próxima unidade de texto (em inglês: *token*) de uma frase, usando um modelo de transformador. Um transformador é um tipo de arquitetura de rede neural treinada em dados não rotulados e, depois, ajustada por meio de algoritmos de aprendizagem supervisionada. Por meio de mecanismos de codificação posicional (em inglês: *positional encoding*), de atenção (em inglês: *attention*) e de autoatenção (em inglês: *self-attention*), cada unidade de texto da frase de entrada é associada a uma posição e processada em uma operação que resulta em uma frase de saída. O processo de conversão de um corpus textual em unidades de texto fornece as entradas que são incorporadas nos cálculos do mecanismo de atenção. Esse modelo utiliza uma arquitetura codificador-decodificador (em inglês:

*encoder-decoder*), na qual o codificador extrai a representação semântica da frase de entrada (ou solicitação). Já o decodificador gera a frase de saída (ou preenchimento) de forma sequencial, uma unidade de texto por vez, da esquerda para a direita [188-190]. Adicionalmente, esse modelo possui três variantes principais: transformador completo (em inglês: *full transformer*), transformador apenas com codificador (em inglês: *encoder-only transformer*) e transformador apenas com decodificador (em inglês: *decoder-only transformer*) [191].

Dado um corpus de unidades de texto, o pré-treinamento de um modelo de linguagem autorregressivo visa minimizar a função de perda do modelo no conjunto completo de textos gerados. Isso é realizado maximizando a verossimilhança logarítmica por meio de uma fatoração autorregressiva direta, apresentada na Equação (25) [192,193].

$$\arg \max_{\theta} [\log \mathcal{L}(\theta|X)] = \arg \max_{\theta} \left[ \sum_{t=1}^{T'} \log p_{\theta}(x_t | x_{t-k'}, \dots, x_{t-1}; \theta) \right], X = [x_1, \dots, x_{T'}] \quad (25)$$

onde  $\log \mathcal{L}(\theta|X)$  é a função log-verossimilhança de um determinado corpus de texto completo  $X$  composto de  $T'$  unidades de texto e  $p_{\theta}$  é a probabilidade condicional da  $t$ -ésima unidade de texto para uma janela de contexto de tamanho  $k'$  (composta pelas unidades de texto predecessoras) modelada por meio de um transformador com vetor de parâmetros  $\theta$ .

Os pesquisadores da OpenAI desenvolveram o modelo de transformadores pré-treinados generativos GPT (em inglês: *Generative Pre-trained Transformers*), que consiste em um modelo de linguagem autorregressivo baseado em um transformador apenas com decodificador e que utiliza estas duas abordagens para aprendizagem em contexto: (i) inferência sem atualização dos pesos pré-treinados, fornecendo ao modelo um pequeno número de exemplos (poucos disparos, em inglês: *few-shots*), um único exemplo (disparo único, em inglês: *one-shot*) ou nenhum exemplo (disparo zero, em inglês: *zero-shot*); e (ii)

ajuste fino, onde os pesos do modelo pré-treinado são atualizados com base em corpus rotulados que pertencem à tarefa específica ou resultado desejado [178,191,193-196].

O ajuste fino envolve treinar o modelo de linguagem autorregressivo em um conjunto de dados menor para uma tarefa específica, com o objetivo de ajustar seus hiperparâmetros. Os hiperparâmetros usuais incluem a taxa de aprendizagem (em inglês: *learning rate*), o tamanho do lote (em inglês: *batch size*) e o número de épocas (em inglês: *number of epochs*). A taxa de aprendizagem define a magnitude com que os pesos do modelo são atualizados durante o treinamento, enquanto o tamanho do lote especifica o número de amostras de treinamento utilizadas em uma única atualização. O número de épocas representa a quantidade de vezes em que o modelo processa todo o conjunto de dados de treinamento [188]. À época desta publicação, a OpenAI oferecia três modelos de ajuste fino por meio de sua API. O modelo GPT-3.5-turbo-0613 permitia o treinamento no formato de bate-papo conversacional (em inglês: *conversational chat format*), enquanto os modelos Babbage-002 e Davinci-002 permitiam o formato de pares solicitação-preenchimento. A Figura 36 ilustra o processo de ajuste fino na unidade de medição proposta, utilizando um modelo de linguagem autorregressivo.

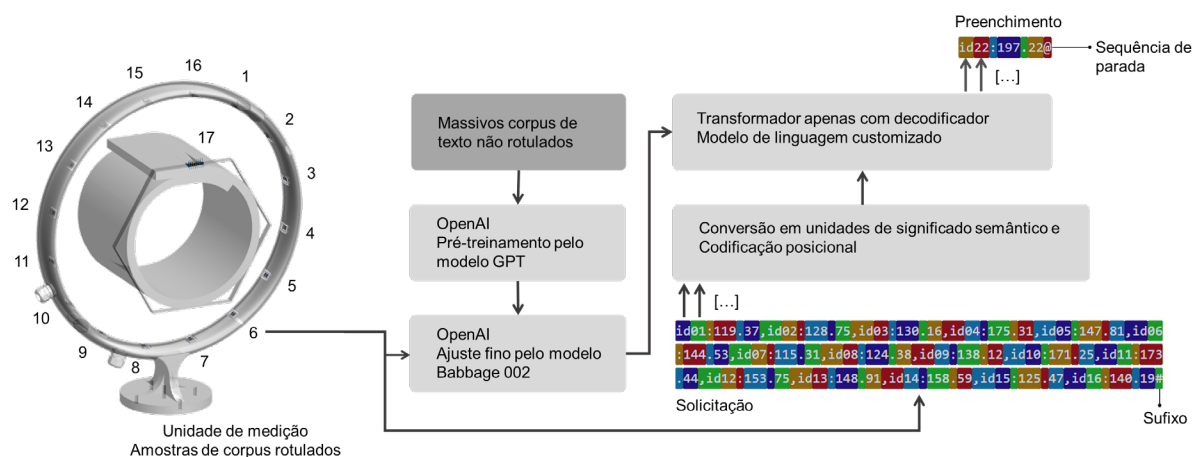


Figura 36. Ajuste fino do modelo de linguagem autorregressivo utilizado na unidade de medição [36].

### 3.6. RESULTADOS

Após a montagem e o comissionamento da bancada de testes, coletaram-se 5.021 amostras para ajuste fino utilizando o modelo de treinamento Babbage-002. Aplicaram-se os seguintes hiperparâmetros ao modelo: número de épocas igual a 4, tamanho de lote igual a 13 e multiplicador da taxa de aprendizagem igual a 2, totalizando 2.088.736 unidades de texto treinadas (103 unidades por par solicitação-preenchimento). O treinamento durou 11,42 minutos, com custo total de 0,8354 dólares americanos (0,40 dólares por 1 milhão de unidades de texto). As métricas de perdas e acurácia ao final do treinamento foram iguais a 0,95658 e 0,78571, respectivamente, conforme apresentado na Figura 37 (a–c). No processo posterior de amostragem, obteve-se um tempo médio de resposta de 625,9226 ms (intervalo de confiança de 95% entre 622,1835 e 629,6617 ms; e tempo de resposta mínimo de 561 ms e máximo de 1246 ms), conforme apresentado na Figura 37c.

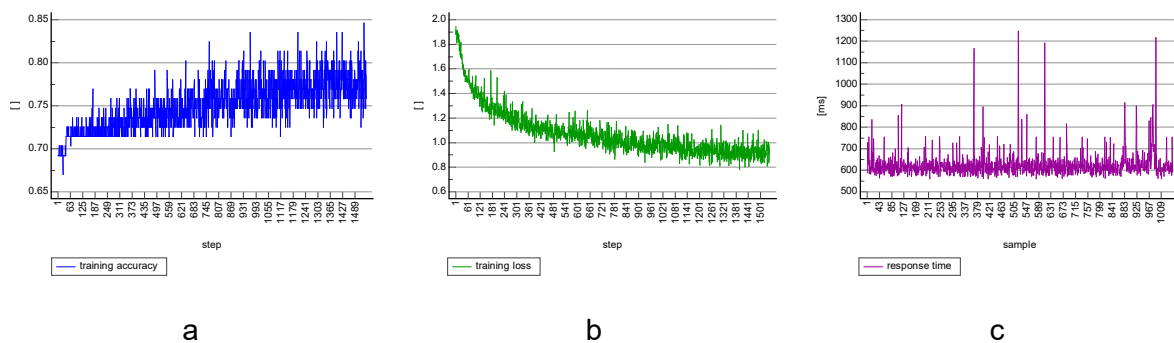


Figura 37. (a) Acurácia e (b) perdas apuradas ao final do treinamento. (c) Tempo de resposta do processo de amostragem [36].

Após a etapa de treinamento, configurou-se o sistema de medição para enviar requisições aos servidores da OpenAI utilizando o modelo ajustado. Em seguida, coletaram-se 1.048 amostras para comparação e avaliação do método de medição, totalizando 107.944 unidades de texto processadas. Durante a inferência, definiu-se a temperatura do modelo para 0,5 (controle de aleatoriedade), limitou-se o número máximo de unidades de texto por requisição a 200 (aproximadamente 4 unidades por caractere padrão do inglês), aplicou-se o valor 1 à

melhor de N respostas (número de preenchimentos processados no servidor por requisição) e estabeleceu-se o tempo limite de resposta em 2.000 ms. A amostragem durou 10,92 minutos e o custo total foi de 0,1727 dólares americanos (1,60 dólares por 1 milhão de unidades de texto). O custo diário estimado para a amostragem, utilizando o modelo ajustado, foi de 22,7701 dólares americanos.

O método de referência para as medições relacionadas à rotação foi a detecção de movimento em 3 eixos (inclinômetro), com a qual se comparou o modelo de linguagem autorregressivo ajustado (IA generativa). Avaliaram-se o ângulo de sobreposição da correia (id17 versus id22), sua velocidade angular (id18 versus id23) e o número absoluto de rotações (id19 versus id24). Para evitar que as transições entre  $359,99^\circ$  e  $0^\circ$  fossem processadas como valores discrepantes de medição (id17 e id22), aplicou-se a função seno às medidas, obtendo-se valores contínuos de  $-1$  a  $+1$ , com a transição igual a zero. Além disso, aplicou-se uma média móvel de 20 amostras para o processamento e avaliação dos dados de velocidade angular (id18 e id23).

Utilizaram-se valores fixos, pré-definidos, como referência para avaliar as medições relacionadas à amostra, comparando-as com os dados coletados. Comparou-se o diâmetro calculado da correia tubular com o valor de 420 mm (id20 versus "420"), correspondente a duas vezes o apótema (raio da circunferência inscrita no polígono) do nicho hexagonal de madeira. Manteve-se a posição da borda externa da correia no lado direito para treinamento e amostragem de dados e, em seguida, registraram-se as medições de posição da borda externa para comparação (id21 versus "1 – direita"). O ensaio consistiu em rotacionar a amostra da correia em uma faixa de deslocamento angular de  $\pm 3$  rotações em relação à posição-alvo. Os ensaios foram realizados em múltiplas repetições e com velocidades

angulares variadas. As Figuras 38 (a–c) e 39 (a–b) apresentam as medições ao longo do tempo de amostragem.

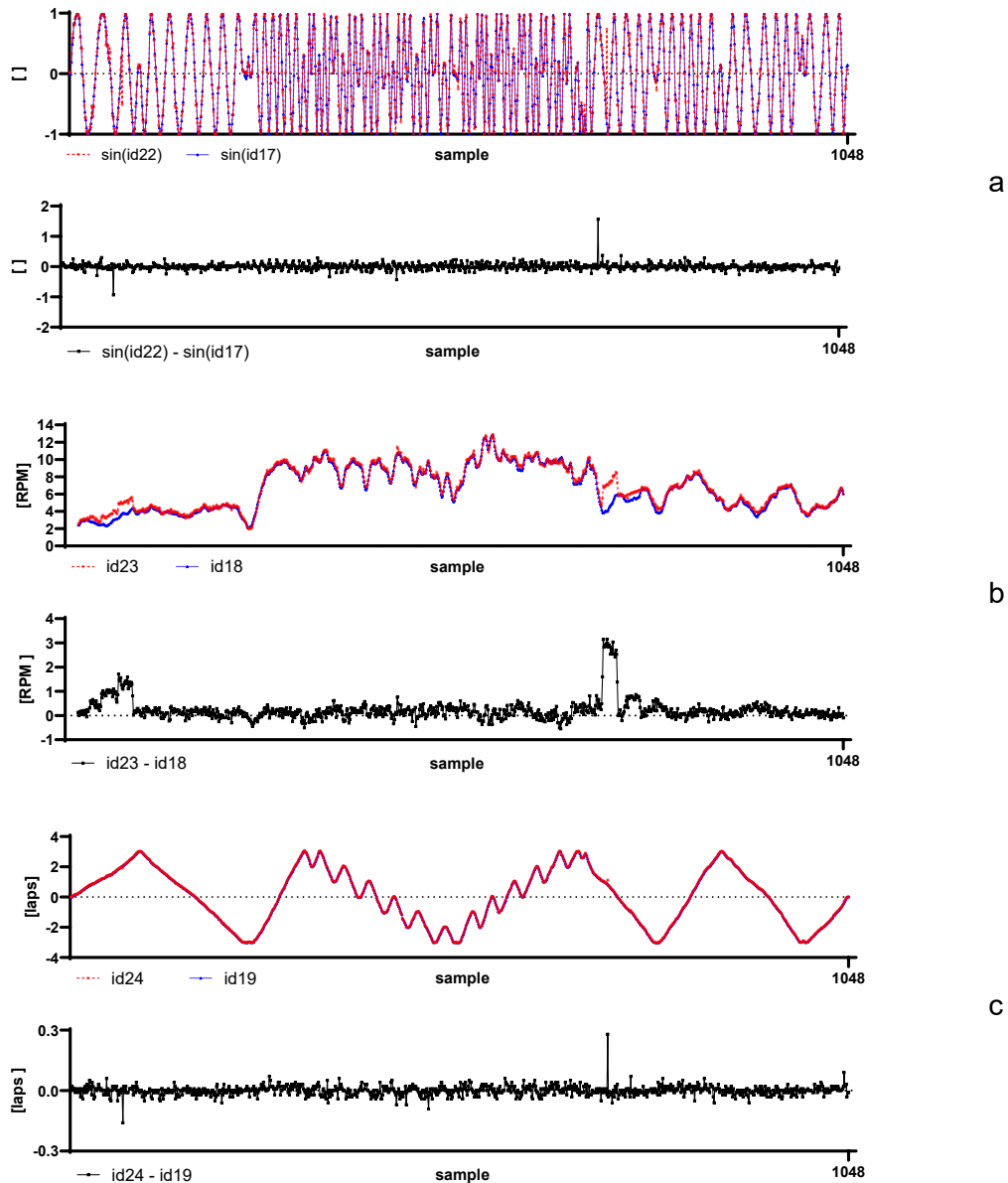


Figura 38. Medições relacionadas à rotação: (a) Seno do ângulo de sobreposição: previsto ( $\sin(id22)$ ), medido ( $\sin(id17)$ ) e diferença ( $\sin(id22) - \sin(id17)$ ); (b) Velocidade angular de rotação da correia em rpm: calculada ( $id23$ ), medida ( $id18$ ) e diferença ( $id23 - id18$ ); (c) Número absoluto de rotações da correia: calculada ( $id24$ ), medida ( $id19$ ) e diferença ( $id24 - id19$ ) [36].

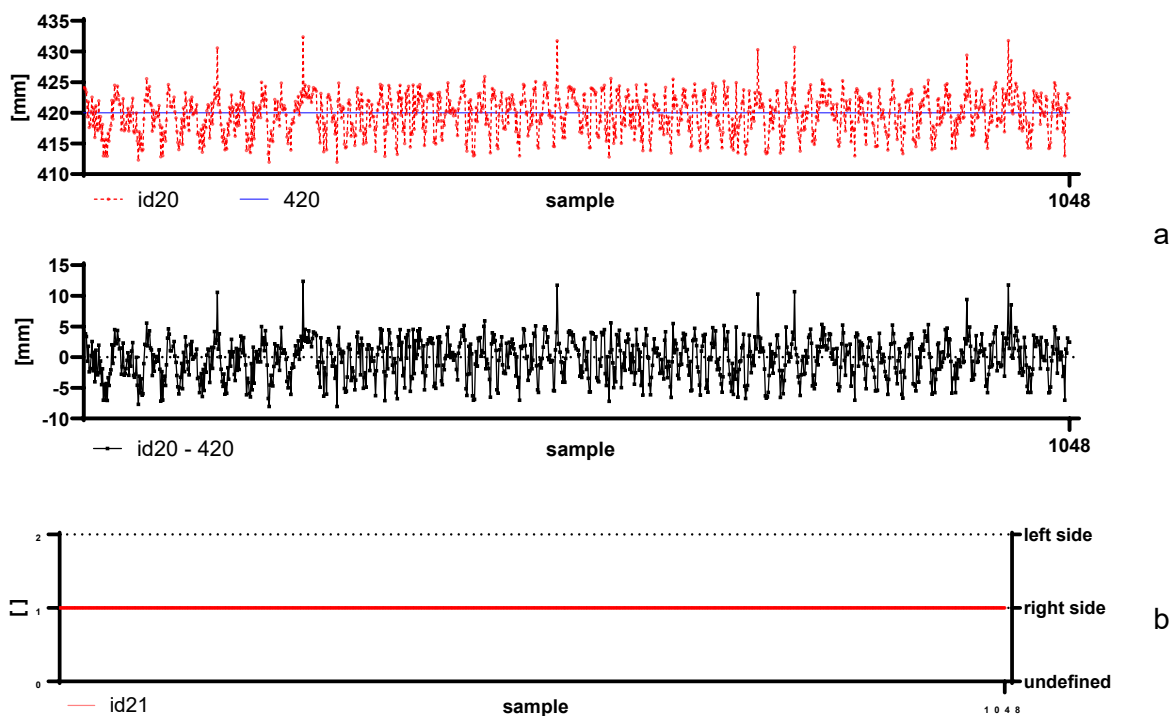


Figura 39. Medições relacionadas à amostra: (a) Diâmetro da correia em mm: calculado (id20), valor de referência (420), diferença (id20 – 420); (b) Posição da borda externa de sobreposição da correia: calculada (id21), valores possíveis (0 – indefinido, 1 – lado direito, 2 – lado esquerdo), valor de referência (1 – lado direito) [36].

Para as medições relacionadas à rotação (ângulo de sobreposição, velocidade angular e número absoluto de rotações), avaliou-se graficamente a simetria e o pico das distribuições das diferenças entre o método proposto e o de referência. Também foram verificados diagramas de dispersão, gráficos quantil-quantil (em inglês: *quantile–quantile plot*, *Q – Q plot*) e gráficos de caixa (em inglês: *Box-and-Whisker plot*), bem como o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. A hipótese nula de normalidade foi rejeitada em todos os casos, com estatísticas de Kolmogorov-Smirnov de 0,0969, 0,0672 e 0,1255, respectivamente. Em seguida, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon para postos sinalizados, com amostras pareadas, cuja hipótese nula assume a ausência de diferenças significativas entre as observações pareadas. Não houve evidência para rejeitar a hipótese nula quanto ao ângulo

de sobreposição e ao número absoluto de rotações, com estatísticas do teste de  $-0,952406$  e  $-0,136802$ , respectivamente. Por outro lado, a hipótese nula foi rejeitada para a velocidade angular, com estatística igual a  $-19,647133$ . Com base nesses resultados, selecionou-se o método de Bland-Altman para analisar as observações do ângulo de sobreposição e do número absoluto de rotações, enquanto o estimador de Hodges-Lehmann foi utilizado para as observações de velocidade angular.

Para o ângulo de sobreposição previsto (id22), o viés foi de  $0,004003$  (intervalo de confiança de 95% entre  $0,002363$  e  $0,01037$ ) e a precisão foi de  $0,2059$  (intervalo de confiança de 95% entre  $0,2019$  e  $0,2099$ ). Aplicando a conversão da função senoidal em graus, o viés foi de  $0,2294^\circ$  (intervalo de confiança de 95% entre  $0,1354^\circ$  e  $0,5942^\circ$ ) e a precisão foi de  $11,8822^\circ$  (intervalo de confiança de 95% entre  $11,6481^\circ$  e  $12,1165^\circ$ ). Para a velocidade angular (id23), o viés foi de  $0,1630$  rpm (intervalo de confiança de 95% entre  $0,1488$  e  $0,1778$  rpm) e a precisão foi de  $0,7344$  rpm (intervalo de confiança de 95% entre  $0,5714$  e  $0,8974$  rpm). Para o número absoluto de rotações (id24), o viés foi de  $0,0001336$  rotações (intervalo de confiança de 95% entre  $0,001252$  e  $0,001519$  rotações) e a precisão foi de  $0,0448$  rotações (intervalo de confiança de 95% entre  $0,04467$  e  $0,04493$  rotações). As Figuras 40 (a–c), 41 (a–c), 42 (a–c), 43 (a–c) e 44 (a–c) apresentam os histogramas, gráficos quantil-quantil, gráficos de caixa, diagramas de dispersão e gráficos de Bland-Altman das medições relacionadas à rotação.

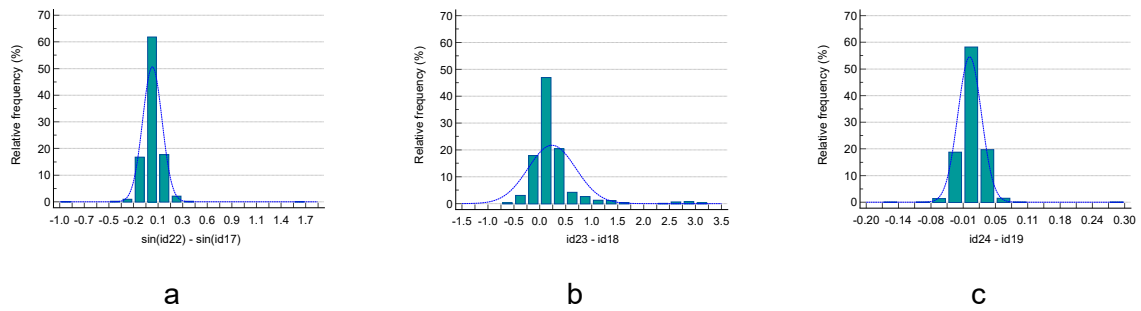


Figura 40. Histogramas das diferenças: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].

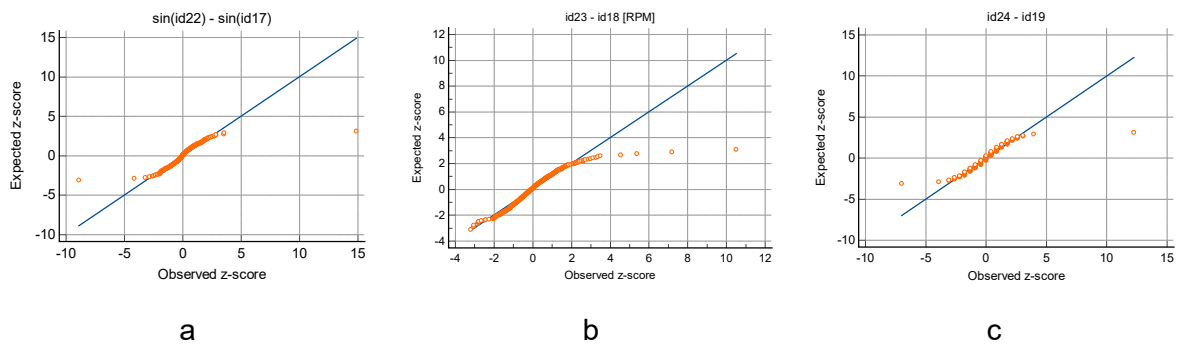


Figura 41. Gráficos quantil-quantil das diferenças: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].

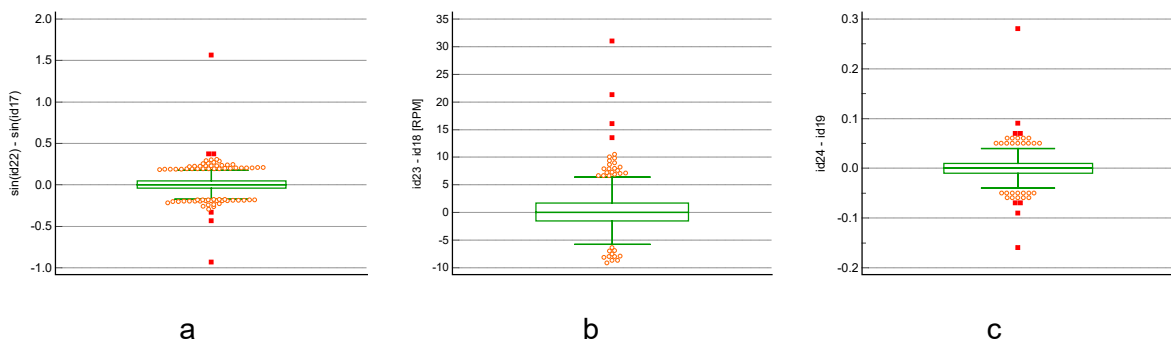


Figura 42. Gráficos de caixa das diferenças: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].

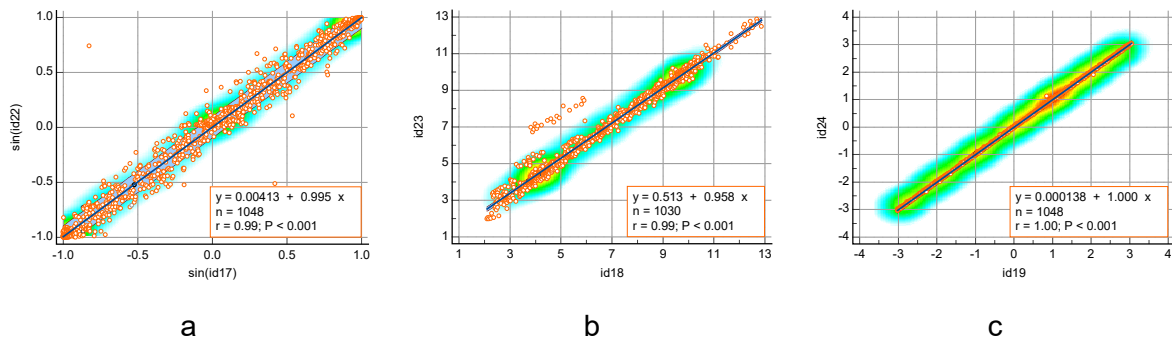


Figura 43. Diagramas de dispersão: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].

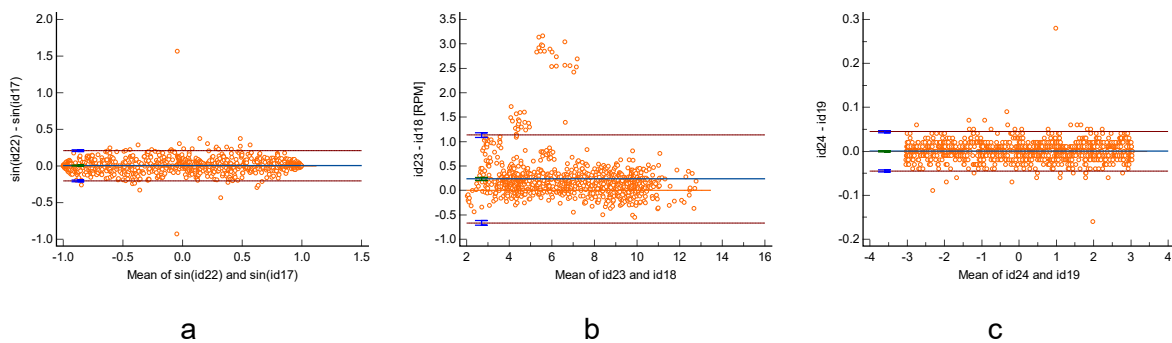


Figura 44. Gráficos de Bland-Altman: (a) Seno previsto (id22) e medido (id17) do ângulo de sobreposição; (b) velocidade angular calculada (id23) e medida (id18) em rpm; e (c) número absoluto de rotações calculado (id24) e medido (id19) [36].

Além disso, calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson para essas três comparações entre métodos. Para o ângulo de sobreposição (id22), o coeficiente foi de 0,9871 (intervalo de confiança de 95% entre 0,9854 e 0,9885). Para a velocidade angular (id23), o coeficiente foi de 0,9838 (intervalo de confiança de 95% entre 0,9817 e 0,9857). Por fim, para o número absoluto de rotações (id24), o coeficiente foi de 0,9999 (intervalo de confiança de 95% entre 0,9999 e 0,9999, limitado pela resolução numérica do software estatístico MedCalc na versão 23.3.7).

Para a medição do diâmetro, avaliaram-se graficamente a simetria e o pico da distribuição, incluindo o gráfico quantil-quantil, o gráfico de caixa e o teste de Kolmogorov-Smirnov para

normalidade. A hipótese nula de normalidade foi rejeitada, pois a estatística de Kolmogorov-Smirnov foi igual a 0,0545. Em seguida, aplicou-se o teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon para uma amostra cuja hipótese nula assume a ausência de diferença significativa entre o valor de teste e as observações. Não houve evidência para rejeitar a hipótese nula ao considerar o valor de teste 420 e as observações de diâmetro, com estatística de teste de  $-1,401365$ . Selecionou-se, então, o teste T paramétrico para uma amostra na análise estatística com base nessa avaliação combinada.

Desse modo, para o diâmetro (id20), o viés foi de  $-0,1984$  mm (intervalo de confiança de 95% entre  $-0,3955$  e  $-0,001271$  mm) e a precisão foi de  $6,3743$  mm (intervalo de confiança de 95% entre  $6,1759$  e  $6,5727$  mm). A Figura 45 (a–c) apresenta o histograma, o gráfico quantil-quantil e o gráfico de caixa para essa medição. Quanto à posição da borda externa (id21), todas as medições registradas foram do lado direito, portanto, em conformidade com o valor verdadeiro.

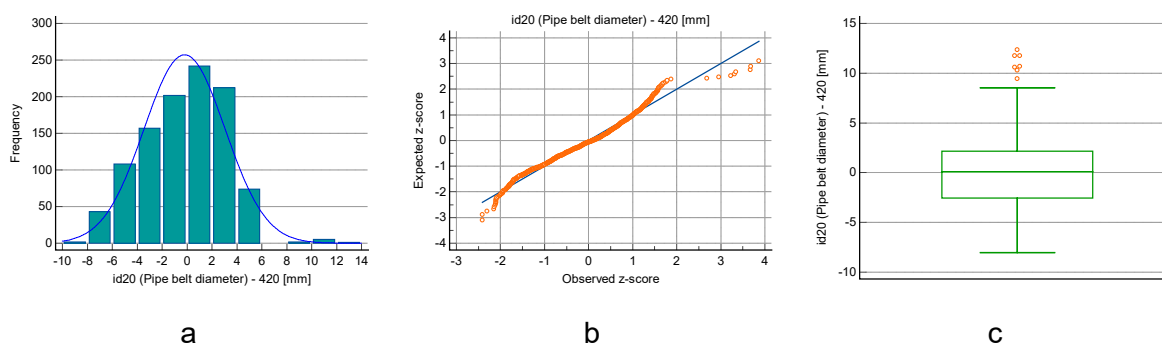


Figura 45. (a) Histograma, (b) Gráfico quantil-quantil e (c) Gráfico de caixa para a diferença entre a medição do diâmetro (id20) e o valor de referência (420 mm) [36].

### 3.7. DISCUSSÃO

Todos os dispositivos IIoT funcionaram conforme esperado, sem problemas de hardware durante os estágios de treinamento e amostragem. A comunicação com os servidores da OpenAI permaneceu estável, sem ultrapassar o tempo limite de conexão (definido para 2.000 ms). A IHM codificada por cores funcionou conforme o projeto, sem erros no programa durante

a criação e a atualização do arquivo CSV. O sistema de medição proposto mostrou-se adequado para o uso pretendido com base no tempo médio de resposta obtido. Mesmo ao lidar com velocidades angulares de rotação da correia acima de 10 rpm, consideradas relativamente altas para um transportador tubular, o sistema de medição processou as respostas corretamente. De acordo com WU *et al.* [197] e EL-SAYED *et al.* [198], uma latência relativamente maior é inerente aos sistemas de computação em nuvem de borda. Uma abordagem para mitigar essa limitação poderia considerar a aplicação de inferências diretamente nos dispositivos de borda, com o treinamento dos modelos na nuvem, conforme implementado por KLIPPEL *et al.* [51]. Para lidar com isso, nesse projeto adotou-se a mínima solicitação viável, de modo a obter os resultados das previsões sem fornecer contexto adicional ao modelo de linguagem (sem recorrer às abordagens de aprendizado de poucos disparos ou de disparo único).

De acordo com OUYANG *et al.* [199], o texto de solicitação pode influenciar significativamente o desempenho de um modelo de linguagem autorregressivo, mesmo quando são realizadas alterações mínimas. Nesse contexto, deve-se considerar o impacto potencial da alucinação no modelo, que pode ser definido como a geração de resultados inconsistentes ou falsos [200,201] desencadeados por diversas causas, como o ajuste excessivo do modelo (em inglês: *model overfitting*) ou inconsistências no próprio texto de solicitação. Devido a essa preocupação, aplicou-se com sucesso a mínima solicitação viável, composta apenas pelas variáveis independentes (id01 a id16). Além disso, o programa limitou a atualização das respostas à faixa de medição de 0° a 359,99° para garantir que os erros fossem gerenciados de forma eficaz, evitando que o operador da bancada de testes recebesse dados inconsistentes.

O modelo ajustado apresentou acurácia de treinamento de 78,6%, indicando o percentual de valores previstos que correspondem ao valor de referência em um cenário de verificação verdadeiro ou falso. A perda de treinamento reduziu de 1,95 para 0,95, apresentando

tendência estável ao final do treinamento. Essa métrica considera a incerteza das previsões em relação aos valores de referência. Essas são pontuações altamente eficazes, considerando que o modelo retorna valores flutuantes de 2 dígitos. Com base nisso, considerou-se o modelo adequado à finalidade e prosseguiu-se com a etapa de amostragem utilizando o sistema de medição proposto.

Quanto aos métodos de medição, não foram encontrados critérios a priori no estado da arte para as medidas propostas e, por isso, adotou-se o conhecimento prático para qualificar esse novo método. Dessa forma, assumiu-se uma rotação de 180° na velocidade angular de 10 rpm, a partir da posição superior da sobreposição, como o limiar de falha devido à rotação da correia tubular, o que constituiu uma proposição empírica para esse estudo de caso específico. Esses limites devem ser adaptados para diferentes transportadores tubulares, com base na gestão da aprendizagem, a partir dos dados adquiridos ao longo do tempo.

Desse modo, consideraram-se o viés e a precisão da medição para o ângulo previsto ( $0,2294^\circ \pm 11,8822^\circ$ ), a velocidade angular ( $0,1630 \pm 0,7344$  rpm) e o número absoluto de rotações ( $0,0001336 \pm 0,0448$  rotações) adequados ao uso pretendido. Isso também é evidenciado pelos fortes coeficientes de correlação de Pearson: 0,9871, 0,9838 e 0,9999, respectivamente. Uma abordagem semelhante foi aplicada à medição do diâmetro. Assumiu-se uma redução empírica de 15% no diâmetro da correia como limiar de falha potencial devido ao aumento da flexibilidade transversal, correspondente a 63 mm nesse estudo de caso. Assim, consideraram-se o viés e a precisão da medição do diâmetro ( $-0,1984 \pm 6,3743$  mm) adequados para a aplicação. Esses resultados são consistentes com as vantagens apontadas por MICHALIK *et al.* [46] sobre bancadas de testes dinâmicos, que permitem a avaliação e a pesquisa de condições reais de operação em aplicações de transportadores tubulares.

### 3.8. CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um equipamento de teste de baixo custo para medir a rotação em correias transportadoras tubulares e demonstrou-se a viabilidade de implementar um sistema de monitoramento da sobreposição utilizando gêmeos digitais, IIoT e modelos de linguagem autorregressivos. A unidade de medição monitorou toda a circunferência da amostra de correia, fornecendo parâmetros operacionais inéditos e uma nova abordagem para reproduzir a rotação em um ambiente de testes controlado, sem comprometer a segurança das equipes envolvidas nem a integridade dos ativos.

Utilizou-se uma amostra de 500 mm de uma correia sobressalente de um transportador tubular de longa distância. Criou-se, com sucesso, um gêmeo digital da geometria da correia tubular e implementou-se uma rede IIoT do tipo controlador-respondente, com dispositivos ESP32. A adoção do protocolo ESP-NOW possibilitou uma arquitetura simplificada, porém robusta, para a transmissão das cadeias de texto utilizadas no treinamento e para a previsão do ângulo de sobreposição da correia, empregando IA generativa na computação em nuvem. A adoção de prototipagem 3D e de sensores infravermelhos de distância demonstrou eficácia e confiabilidade para essa aplicação, oferecendo uma alternativa econômica e escalável às soluções existentes que utilizam sensores LiDAR ou insertos posicionados ao longo da correia.

As solicitações periódicas por difusão implementadas no módulo controlador e a rotina de autorização baseada no reconhecimento de endereços *MAC* (utilizando respostas unidirecionais) forneceram uma configuração de rede eficaz e confiável que pode ser reproduzida e aplicada em pesquisas futuras. Desenvolveu-se um programa em Python para historicizar localmente os dados de treinamento e de amostragem. Ajustou-se um modelo de linguagem autorregressivo, aplicando o treinamento do modelo Babbage-002 no servidor da OpenAI para prever o ângulo de sobreposição da correia. A abordagem de ajuste fino,

utilizando a mínima solicitação viável, composta apenas pelas variáveis independentes (id01 a id16), mostrou-se adequada para essa aplicação de medição, uma vez que o conjunto de dados de treinamento foi suficientemente abrangente.

A IHM codificada por cores e o registrador de dados habilitaram um novo conjunto de medidas preditivas nesse campo de pesquisa, fornecendo importantes parâmetros operacionais, incluindo: ângulo de sobreposição ( $0^\circ$  a  $359,99^\circ$ ), velocidade angular (em rpm), número absoluto de rotações, diâmetro da correia tubular (em mm) e a posição da borda externa da correia (indefinida, esquerda ou direita). Também foi fornecido ao usuário um estado de integridade do ativo com base na posição atual do ângulo de sobreposição, com as seguintes categorias: excelente, boa, regular, ruim, crítica e falha potencial.

Os custos de treinamento e amostragem associados à unidade de medição proposta são altamente atrativos para processos de manuseio de granéis sólidos. Essa relação custo-benefício tem potencial para gerar economia substancial nas inspeções de campo, bem como para prever as torções da correia por meio da detecção precoce de rotação crítica. Além disso, essa solução pode ajudar a reduzir despesas com seguros e mitigar outros custos associados, tornando-se economicamente vantajosa. Isso está de acordo com as boas práticas apresentadas por OZDEMIR [188], que destacou que o ajuste fino pode ser altamente econômico para modelos de linguagem autorregressivos menores, a longo prazo. Nesse contexto, a adoção da mínima solicitação viável mostrou-se útil para reduzir os custos da aplicação por requisição.

### 3.9. TRABALHOS FUTUROS

As limitações desse estudo incluem a condição estática da amostra da correia em sua direção longitudinal. Portanto, será necessário avaliar o impacto da velocidade longitudinal na medição de distância realizada pelo sensor de imagem CMOS. Além disso, variáveis ambientais e operacionais, como calor, luz solar, água da chuva, poeira e vibrações do

dispositivo, podem influenciar a exatidão da medição. O sensor adotado possui faixa máxima de temperatura operacional de até 60 °C e não deve receber luz solar direta ou luz halógena; caso contrário, poderá comprometer a precisão da medição. O acúmulo de água da chuva ou de poeira nos sensores de imagem pode causar reflexão da luz, exigindo a aplicação de uma película protetora (de material acrílico e com transmitância > 90% como pré-requisito). Vibrações na unidade de medição, decorrentes das frequências de onda transversais da correia ou das frequências de excitação dos rolos dos painéis fechados, podem causar estresse mecânico nas placas de circuito impresso, levando a falhas nos componentes.

Em estudos futuros, uma unidade de medição será instalada em um transportador tubular operacional para a coleta de dados e a avaliação de desempenho. Também será considerada a escalabilidade do modelo proposto, por meio de dispositivos de baixo custo e peso, que poderão ser expandidos para múltiplas posições ao longo da rota de um transportador, com consumo de energia extremamente baixo. Isso permitirá que células solares, pequenas turbinas eólicas, dispositivos de captação de energia por vibração em pequena escala, baterias, tacogeradores ou outros métodos de carregamento forneçam energia elétrica para unidades de medição autônomas conectadas a uma arquitetura de malha. Essa abordagem agregará valor significativo às aplicações que envolvam transportadores tubulares instalados em áreas remotas ou equipamentos de longa distância, aumentando a eficiência e a autonomia dessas aplicações.

A implementação de protocolos de comunicação de longo alcance, como GSM/GPRS ou LoRaWAN, poderá ampliar significativamente as pesquisas futuras. Isso pode ser obtido, por exemplo, atualizando o módulo controlador para um dispositivo ESP32 com GSM/GPRS e criando um programa dedicado para transmitir as leituras de medição a um servidor em nuvem usando dados móveis. Como alternativa, o módulo controlador pode ser substituído por um

par de dispositivos ESP32-LoRa (emissor e receptor), permitindo comunicação ponto a ponto até um local de interesse nas instalações do proprietário do ativo.

### 3.10. FINANCIAMENTO

Este trabalho recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), sob o financiamento UNIVERSAL-00968/22.

## CAPÍTULO 4

### 4. MODELO DE DIGITALIZAÇÃO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um modelo de digitalização para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares. O capítulo descreve as hipóteses formuladas sobre os princípios tecnológicos que definem os requisitos mínimos do sistema, bem como as tecnologias habilitadoras adotadas para fomentar a inovação. O texto é uma tradução não oficial da publicação de DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [59] e contém ajustes gramaticais e descritivos para adequação à língua portuguesa, sem alteração do conteúdo e da mensagem original.

#### 4.1. TÍTULO DA PUBLICAÇÃO

Um modelo de digitalização para o monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares.

#### 4.2. RESUMO DO CAPÍTULO

Transportadores tubulares oferecem uma alternativa ambientalmente favorável aos transportadores de correia aberta para o manuseio de granéis sólidos, especialmente em rotas de longa distância ou complexas. Entretanto, a sustentabilidade desta tecnologia é comprometida pela instabilidade operacional. Rotas complexas, variações operacionais e fatores ambientais resultam em forças de contato desiguais, o que desencadeia a rotação da correia. Este é um modo de falha crítico que requer monitoramento contínuo ao longo do ciclo de vida do transportador. A escassez de dados de falha é um desafio comum nesta aplicação. Formularam-se hipóteses sobre os princípios tecnológicos que constituem os requisitos mínimos para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da rotação da correia. Adotaram-se tecnologias habilitadoras para fomentar a inovação e implementou-se um protótipo físico para mitigar a escassez de dados relativa a este modo de falha.

Utilizando uma rede sem fio controlador-respondente de dispositivos ESP32 de Internet Industrial das Coisas, desenvolveu-se um sistema de medição independente da correia, com capacidade multiparâmetro. Estabeleceram-se critérios-chave para detectar estados operacionais inseguros e uma abordagem baseada na criticidade para determinar as quantidades ótimas de unidades de medição. Os resultados de medição demonstraram precisão adequada para fins de digitalização: ângulo de sobreposição ( $3,3107 \pm 16,7562^\circ$ ), diâmetro da formação tubular ( $+13,3850 \pm 7,2114$  mm) e comprimento de sobreposição ( $-26,2750 \pm 25,1536$  mm), com base em 307 amostras com uma latência de 350,1303 ms. O modelo demonstrou potencial para aplicação industrial com desempenho aceitável para monitoramento em tempo real.

#### 4.3. INTRODUÇÃO

Formularam-se hipóteses sobre seis princípios tecnológicos, considerados o mínimo necessário para viabilizar, em larga escala, a aplicação industrial do monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares. No modelo proposto, o protótipo tem como objetivo criar um gêmeo físico intermediário para abordar tanto a escassez quanto a rotulagem de dados relativas ao modo de falha da rotação da correia, mitigando, assim, seus efeitos em aplicações práticas. Ao incorporar variáveis de campo, buscou-se preencher a lacuna de dados de treinamento para a computação assistida e aprimorar o nível de prontidão tecnológica (em inglês: *Technology Readiness Level – TRL*) dos métodos de monitoramento existentes. Nesse estudo, projetou-se e implementou-se um protótipo multiparâmetro de uma seção de correia tubular, utilizando um aparato de testes dedicado. Esse resultado foi alcançado por meio da reprodução e ampliação do método proposto por DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [36], que, segundo o estado da arte, constitui a primeira implementação multiparâmetro de um gêmeo ciberfísico para o monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares. Para esse fim, adotaram-se três tecnologias habilitadoras que sustentam a abordagem de digitalização proposta.

Na camada física, adotaram-se sensores de distância infravermelhos analógicos conectados a dispositivos IIoT ESP32 e empregou-se uma rede sem fio controlador-respondente. A abordagem expandida compreendeu um mecanismo de posicionamento ajustável no dispositivo de medição e um motor de vibração de velocidade variável. Implementaram-se também mecanismos para regular a razão entre o comprimento da correia e o diâmetro da formação tubular (relação B/D) e para alternar a posição da borda externa da correia. Utilizou-se um suporte móvel equipado com uma alavanca para girar a amostra de correia. Implementaram-se módulos de sensores Bluetooth para coletar medições de movimento em 3 eixos, de vibração e de temperatura ambiente. Implementou-se uma camada de borda em Python e ajustou-se um modelo de linguagem de grande porte (em inglês: *Large Language Model – LLM*), empregando palavras-chave estruturadas e medições de distância para explorar o conhecimento prévio incorporado ao mecanismo de atenção do modelo e prever o ângulo de sobreposição da correia, bem como a posição de sua borda externa. A computação assistida ocorreu em servidores da OpenAI por meio de uma interface de programação de aplicações (em inglês: *Application Programming Interface – API*).

Desenvolveu-se, então, uma interface homem-máquina (IHM) integrada a recursos de rotulagem e registro de dados para fins de treinamento e historicização. Reproduziram-se com sucesso os métodos para medir o ângulo de sobreposição, a velocidade angular, o número de rotações absolutas, o diâmetro da formação tubular e a posição da borda externa da correia. Adicionalmente, o método expandido incorporou as medições de vibração em velocidade (em mm/s RMS), temperatura ambiente (°C), iluminância (lx), comprimento de sobreposição (em mm), relação B/D e latência (ms).

#### 4.4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta a abordagem sistemática adotada para a implementação do modelo proposto. Projetou-se e desenvolveu-se uma bancada de teste equipada com uma amostra de correia, a partir da qual se coletaram dados para validar os cinco primeiros princípios

tecnológicos hipotetizados. Em seguida, propôs-se um modelo matemático baseado em criticidade para implementar múltiplos pontos de medição ao longo da rota de um transportador tubular, e os cálculos foram apresentados em uma aplicação prática.

#### 4.4.1. Contexto da Transformação Digital

A digitalização do monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares apresenta desafios tecnológicos significativos para a integração de sistemas ciberfísicos (em inglês: *Cyber Physical Systems – CPS*), IIoT e IA generativa. Por exemplo, a discrepância temporal entre gêmeos digitais e físicos pode tornar o modelo inviável. FRASHERI *et al.* [202] propuseram uma abordagem de cosimulação, utilizando um gêmeo digital passivo (ou sombra digital) como mecanismo para detectar a degradação de rede, por meio de um estudo de caso envolvendo um robô em miniatura equipado com um sistema de posicionamento interno.

No contexto da IIoT, a latência no processamento de dados é uma preocupação. LIU *et al.* [203] destacaram questões de latência em arquiteturas tradicionais voltadas ao armazenamento e processamento de dados industriais na nuvem. Os autores propuseram a adoção de um modelo de rede de IIoT híbrida, nuvem-névoa, no qual a névoa realiza o processamento local e a nuvem é responsável pelo processamento remoto, e validaram seu algoritmo em um estudo de caso de uma máquina de transferência de coque, coletando sinais de início e parada, bem como as posições e imagens das hastes do êmbolo empurrador. SINGH *et al.* [204] projetaram e implementaram um sistema de monitoramento de máquinas, abordando diversos desafios na integração de soluções de IIoT e de inteligência artificial (IA) em equipamentos operacionais, com impacto mais significativo em pequenas e médias empresas (em inglês: *Small and Medium-sized Enterprise – SMEs*). Em um estudo de caso, os autores empregaram um circuito de prototipagem customizado, equipado com um módulo ESP32, para otimizar o planejamento da produção em tempo real, combinando o protocolo de transporte de filas de mensagens de telemetria (em inglês: *Message Queuing Telemetry Transport – MQTT*) com um mecanismo de aplicação de regras baseado em IA.

Além disso, a escassez de dados ou de anotações pode limitar o uso de computação assistida por IA generativa em aplicações industriais de missão crítica. Em um estudo de caso que utilizou um repositório de dados de operação até a falha, HAKAMI [205] investigou o impacto da limitação de dados, do desequilíbrio de classes entre os modos de falha e da dependência do mapeamento de padrões temporais ao aplicar técnicas de aprendizado de máquina para manutenção preditiva. O autor gerou dados sintéticos por meio de uma rede adversária generativa (em inglês: *Generative Adversarial Network – GAN*) [206] e implementou uma rede neural com memória de curto e longo prazo (em inglês: *Long Short-Term Memory – LSTM*) [207] para o aprendizado de padrões temporais de componentes semelhantes. SOBREIRA *et al.* [208] realizaram um estudo de caso para abordar a escassez de dados na medição da vazão mássica em correias transportadoras. Os autores combinaram dados de corrente do motor de um alimentador com medições de uma balança dinâmica instalada em um transportador a jusante e aplicaram com sucesso o método da árvore de decisão para aprendizado de máquina. MATOS *et al.* [209] empregaram um sensor de detecção e alcance de luz 2D (em inglês: *Light Detection and Ranging – LiDAR*) para o reconhecimento e a classificação, em tempo real, das propriedades dos granéis sólidos transportados por correias transportadoras, incluindo a fragmentação e o tipo de rocha. LI *et al.* [210] adotaram uma abordagem de aumento de dados para superar a escassez de dados na detecção de falhas em correias reforçadas com cabos de aço. SALIM *et al.* [211] desenvolveram um sensor de identificação por radiofrequência em ultra-alta frequência (em inglês: *Ultra-High Frequency Radio Frequency Identification – UHF-RFID*) embutido em correias com reforço têxtil para medir a intensidade do sinal recebido decorrente da propagação de fissuras. LUO *et al.* [212] aplicaram o modelo de visão computacional YOLOv5 para analisar vídeos de operação de correias transportadoras abertas, capturados por um robô de inspeção, com o objetivo de detectar materiais contaminantes. Em outro estudo de caso, XU *et al.* [213] propuseram um método baseado em nuvem de pontos 3D, utilizando uma câmera a laser binocular, para detectar e caracterizar rasgos longitudinais em transportadores de correia aberta.

Em aplicações de IA generativa, a ampla adoção de modelos de linguagem autorregressivos tem permitido múltiplas soluções para integrar informações industriais. TAO *et al.* [214] conduziram um estudo de caso, utilizando modelos de linguagem e conjuntos de dados de acesso aberto para o diagnóstico de falhas em rolamentos. Os autores desenvolveram uma abordagem com solicitações customizadas, baseadas em características no tempo e na frequência, para um ajuste fino do modelo, resultando em uma classificação padronizada para o diagnóstico de falhas. Além disso, adotou-se um valor reduzido do parâmetro de temperatura para alcançar maior estabilidade, bem como um número igual de amostras agrupadas por modo de falha, a fim de evitar o desequilíbrio entre as classes. Mantiveram-se inalteradas as camadas do mecanismo de atenção, a fim de preservar o conhecimento pré-treinado do modelo selecionado. BAHR *et al.* [215] propuseram um modelo de geração aumentada por recuperação com gráfico de conhecimento (em inglês: *knowledge graph-enhanced retrieval-augmented generation – KG-RAG*) para aprimorar a análise dos modos de falha e efeitos (em inglês: *Failure Mode and Effects Analysis – FMEA*). O estudo de caso envolveu o uso de um robô conversacional customizado para consulta a um amplo gráfico de conhecimento da análise *FMEA* realizada. Utilizou-se um modelo de linguagem para pré-processar as perguntas dos usuários e recuperar dados estruturados antes de fornecer as respostas. Usuários especialistas avaliaram a qualidade das respostas quanto à correção, usabilidade, relevância, completude e tempo de recuperação. Em um estudo abrangente sobre o impacto da IA na gestão da inovação, ZHANG e ZHANG [216] destacaram que a IA generativa pode melhorar a eficiência e qualidade da integração de informações na detecção de anomalias e mitigação de riscos.

Pesquisadores e desenvolvedores têm empregado várias técnicas de modelagem e solicitação para mitigar os efeitos de desequilíbrio entre classes, alucinações do modelo e incerteza na geração dos dados. Mesmo para estratégias que envolvem iterações humanas (em inglês: *human-in-the-loop*), a anotação de dados para pré-treinamento pode levar a um

problema de discordância, em que diferenças de opinião ou de crença entre indivíduos ou grupos afetam as avaliações qualitativas [217].

Embora os modelos de linguagem autorregressivos sejam cada vez mais acessíveis e integrados a processos industriais, a abordagem de geração da próxima unidade de texto constitui um desafio em aplicações de medição. De modo geral, a geração direta de números em ponto flutuante que representem variáveis dependentes em modelos de linguagem constitui um desafio complexo para lidar com a generalização do modelo e com a sensibilidade da função de perda durante o ajuste fino, aspectos pouco adequados a valores contínuos. YANG *et al.* [218] introduziram uma referência para avaliar a capacidade de compreensão e de processamento numérico em um modelo de linguagem (em inglês: *Numerical Understanding and Processing Abilities – NUPA*). O referencial organiza conceitos numéricos em diferentes representações, incluindo números em ponto flutuante, e abrange tarefas como aritmética elementar, comparação, reconhecimento de dígitos e conversão entre representações. Para fornecer uma avaliação mais detalhada, além da exatidão numérica, os autores também mediram o número de dígitos decimais e a correspondência entre eles. Os resultados mostraram que modelos como GPT-4o, GPT-4o-mini e Qwen2 apresentaram desempenho razoável em tarefas elementares envolvendo números de até oito dígitos; no entanto, sua precisão caiu significativamente para números de mais dígitos e para tarefas mais complexas.

#### 4.4.2. Lacuna de Pesquisa e Hipótese

Para enfrentar os desafios da digitalização do monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares, adotou-se um encadeamento lógico voltado à avaliação do modo de falha e de seus efeitos, com o objetivo de propor princípios tecnológicos para orientar os esforços de digitalização industrial em larga escala. O cenário operacional predominante dos transportadores tubulares envolve rotas curvas, o que frequentemente justifica, tecnicamente, a adoção dessa tecnologia em detrimento dos transportadores de correia aberta

convencionais. Nesses sistemas, a correia tende a rotacionar nos trechos curvos [7] e o alinhamento nem sempre é eficaz, o que exige monitoramento contínuo para manter a posição de sobreposição da correia dentro de limites toleráveis [10]. Esse modo de falha pode ocasionar desalinhamento persistente nas zonas de transição do transportador, com consequências potencialmente catastróficas devido à dobra da correia nos tambores [5]. Assim, cada evento de rotação da correia, além dos limites toleráveis, tem potencial para gerar perdas operacionais e financeiras relevantes, o que representa um desafio para a coleta e a anotação de dados sobre posições anormais da correia e, conseqüentemente, restringe o aprendizado de padrões temporais e espaciais associados a esses eventos. Diante dessas características, propôs-se a adoção de um gêmeo físico intermediário para permitir a simulação irrestrita de cenários de rotação e para abordar a escassez e a rotulagem de dados associadas ao modo de falha da rotação da correia. Esse raciocínio fundamentou o primeiro princípio tecnológico deste estudo: protótipo físico para treinamento.

Em seguida, avaliaram-se soluções comerciais e patentes publicamente disponíveis para identificar técnicas de medição favoráveis a esse esforço de digitalização, capazes de viabilizar aplicações industriais em larga escala. As técnicas de medição podem ser classificadas como independentes ou dependentes da correia. As técnicas independentes consistem em realizar medições sem contato com a correia, por meio de sensores de distância ou de processamento de imagens. Por outro lado, as técnicas dependentes envolvem a incorporação de marcadores magnéticos ou identificadores por radiofrequência (em inglês: *Radio Frequency Identification* – RFID), espaçados equidistantemente ao longo da correia durante o processo de fabricação ou vulcanizados a posteriori, ou o uso de sensores de torque em contato com a superfície da correia [5]. Nesse contexto, a manutenibilidade é um elemento-chave para viabilizar aplicações de monitoramento em larga escala. Correias tubulares são propensas ao desgaste, que pode ocorrer em várias formas, incluindo desgaste superficial, transversal, longitudinal, perfurado ou nas bordas da correia. Como efeito colateral, os

elementos embutidos na correia podem ser danificados ou removidos durante a operação ou durante a substituição de seções da correia, o que requer a desativação dos sistemas de monitoramento. Um cenário semelhante é recorrente nos detectores de rasgos empregados em transportadores de correia aberta. Adicionalmente, a correia está sujeita a fadiga cíclica, contaminação, envelhecimento e intemperismo. Por esta razão, propôs-se adotar técnicas de medição independentes da correia como o segundo princípio tecnológico no modelo de digitalização proposto.

Em transportadores tubulares, a rotação da correia pode ser desencadeada por inúmeros fatores, incluindo condições ambientais como ventos fortes, chuvas intensas, temperaturas abaixo de zero e exposição cumulativa à luz solar, ao ozônio, ao oxigênio e ao calor. Fatores adicionais, como paradas prolongadas, granéis sólidos de difícil fluidez, desaguados ou deteriorantes, bem como graus de enchimento instáveis, também contribuem para este modo de falha. Outros aspectos incluem rota do transportador inadequada, velocidade de operação elevada, flecha da correia entre painéis, elevado número de ciclos de abertura e fechamento, reforço da correia inadequado, baixa razão entre o comprimento da correia e o diâmetro da formação tubular, baixa rigidez transversal, desalinhamento dos painéis, variação de dureza ao longo do comprimento da correia, problemas de vulcanização na fabricação da correia ou realização de emendas, tensão excessiva durante a instalação, tensão de esticamento incorreta, alinhamento incorreto dos rolos, baixa tensão nos rolos de moldagem, bem como a falta ou travamento de rolos [5]. Conforme delineado por ZAMIRALOVA [12], esse modo de falha ainda necessita de investigação e abordagens práticas de alinhamento da correia podem se mostrar ineficazes. Assim, ampliar as soluções de monitoramento da rotação requer mais do que apenas medir a posição de sobreposição. A coleta abrangente de dados auxiliares, incluindo temperatura e iluminação ambiente, vibração e a razão entre o comprimento da correia e o diâmetro da formação tubular, pode sustentar uma abordagem preditiva. Propôs-

se, portanto, a adoção do processamento multiparâmetro como terceiro princípio tecnológico nos esforços de digitalização.

Além disso, avaliou-se o cenário de instabilidade operacional, que frequentemente afeta os transportadores tubulares e pode provocar torções na correia. Tais situações podem gerar interpretações equivocadas em sistemas de monitoramento que se baseiam exclusivamente na detecção de ângulo, o que representa um desafio tanto para inspeções manuais quanto para as automatizadas. Para ilustrar os problemas de interpretação decorrentes de correias instáveis ou torcidas, considerou-se um cenário hipotético envolvendo dois técnicos de manutenção inspecionando a correia no segmento de retorno do transportador, em pontos distintos, enquanto se comunicam por rádio, conforme mostrado na Figura 46. Dado que a correia torcida aparece na posição inferior em ambos os pontos de inspeção, os técnicos podem concluir, equivocadamente, que a correia se encontra em condições estáveis. Fatores adicionais, como restrições de acesso, iluminação inadequada e fatores humanos, podem intensificar essa interpretação incorreta, resultando em decisões de intervenção tardias ou em incidentes operacionais associados à rotação da correia. Por essa razão, propôs-se o monitoramento da rotação absoluta da correia como o quarto princípio tecnológico do modelo de digitalização.

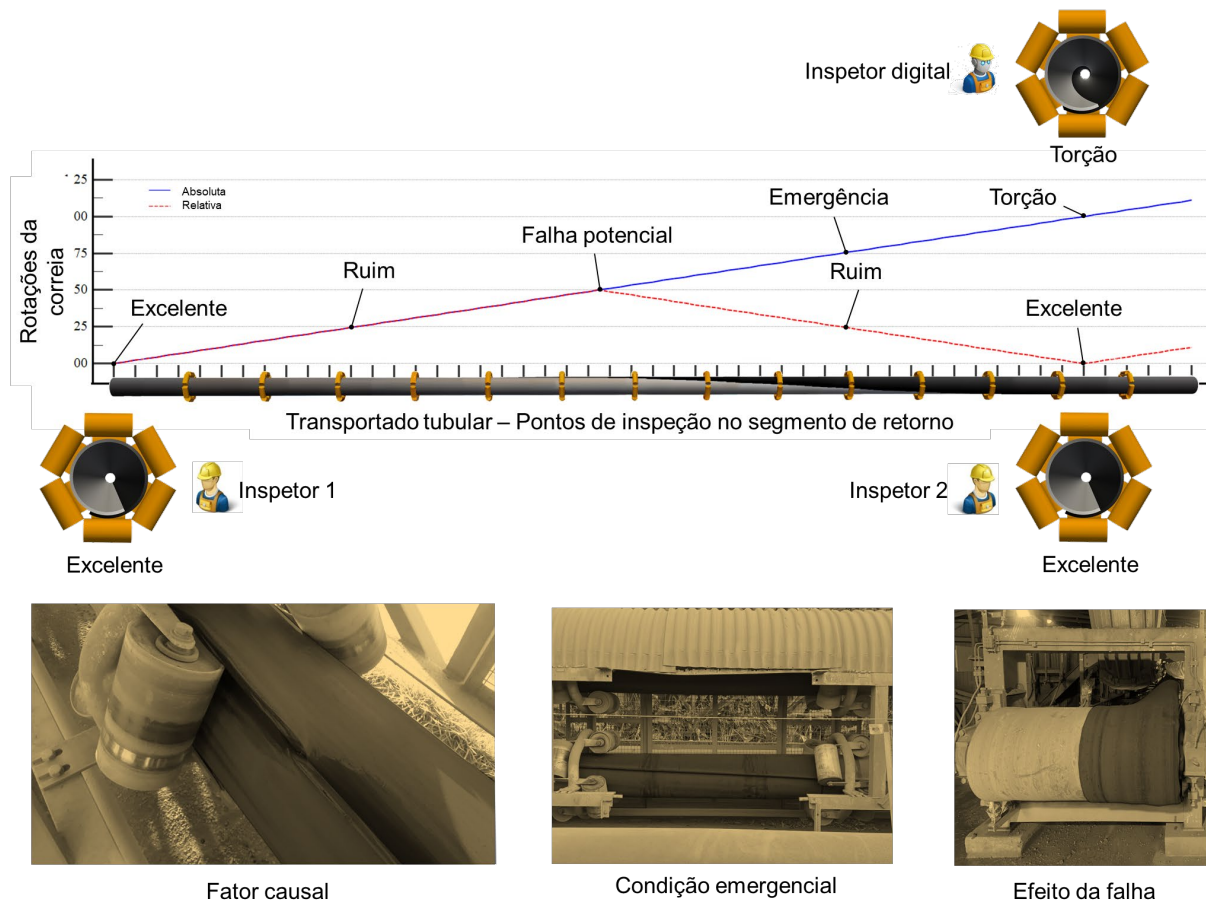


Figura 46. Problema de interpretação incorreta no monitoramento da rotação da correia. A alternância das bordas de sobreposição causou torção na correia e resultou em uma falha funcional, com consequente dobra da correia no tambor de retorno do transportador tubular. As imagens foram recoloridas para fins acadêmicos [59].

Os quatro primeiros princípios tecnológicos permitem o monitoramento de variáveis operacionais-chave da rotação da correia em transportadores tubulares. No entanto, dois desafios críticos ainda precisam ser enfrentados: identificar os estados inseguros e determinar o tempo necessário para prevenir os efeitos da falha. O primeiro desafio requer uma compreensão abrangente das medidas preditivas aplicáveis aos transportadores tubulares, incluindo a posição-alvo de sobreposição da correia, o número admissível de rotações, a velocidade crítica de rotação e a relação B/D ótima. O segundo está associado à latência entre a detecção e resposta do sistema, ao tempo de parada segura da correia, considerando

desaceleração controlada ou inercial, e ao comprimento da zona de transição do transportador. Dessa forma, qualquer esforço de digitalização em larga escala para o monitoramento da rotação deve assegurar a detecção oportuna de estados inseguros e a prevenção da dobra da correia nos tambores do transportador, o que constitui o quinto princípio tecnológico do modelo proposto.

Finalmente, consideraram-se as características operacionais típicas da rota em transportadores tubulares, geralmente longa ou topograficamente complexa. Esse tipo de configuração exige inspeções frequentes ao longo da rota, com o registro da posição da correia em pontos críticos, especialmente nos trechos curvos. Essa abordagem de gestão do conhecimento permite que as equipes operacionais e de manutenção identifiquem tendências e antecipem cenários indesejáveis. No entanto, este processo de tomada de decisões ainda se baseia, em grande parte, em avaliações não estruturadas, devido à escassez de dados rotulados de falha. Dessa forma, considerou-se a adoção de uma distância de proteção unitária para estimar o número de dispositivos necessários a fim de mitigar a necessidade de inspeções manuais frequentes. Por essa razão, propuseram-se múltiplos pontos de medição ao longo da rota, como o sexto princípio tecnológico para o monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares, conforme apresentado no modelo de digitalização a seguir:

- Princípio 1: Protótipo físico para treinamento;
- Princípio 2: Técnicas de medição independentes da correia;
- Princípio 3: Processamento multiparâmetro;
- Princípio 4: Monitoramento das rotações absolutas da correia;
- Princípio 5: Detecção oportuna de estados inseguros;
- Princípio 6: Múltiplos pontos de medição ao longo da rota.

Na implementação do modelo de digitalização, as tecnologias habilitadoras desempenham um papel fundamental. Em aplicações de transportadores tubulares, o monitoramento da rotação da correia pode ser significativamente afetado pela rota do transportador, pelas restrições de acesso estrutural e pela disponibilidade de mão de obra [5]. Assim, soluções escaláveis devem considerar a integração de dados em ambientes remotos e hostis, ao mesmo tempo em que priorizam a manutenibilidade, o que favorece a adoção de redes IIoT. Além disso, custos e prazos de implementação são variáveis sensíveis, especialmente para pequenas e médias empresas, e a adoção de computação assistida por meio de modelos de linguagem pode viabilizar uma implantação escalável e acelerada. Ademais, a disponibilidade de informações em tempo real sobre condições inseguras ou métricas preditivas, combinada com recursos de anotação de dados, favorece a adoção de interfaces homem-máquina para o monitoramento da rotação da correia. Dessa forma, adotaram-se as seguintes três tecnologias habilitadoras nos esforços de digitalização:

- Tecnologia Habilitadora 1: Redes IIoT;
- Tecnologia Habilitadora 2: Computação assistida por modelos de linguagem;
- Tecnologia Habilitadora 3: Interface Homem-Máquina.

Para estabelecer e avaliar o desempenho do método proposto no modelo de digitalização, em comparação com os métodos existentes, definiram-se características-alvo. No caso de soluções patenteadas publicamente disponíveis, a base teórica limita a avaliação da precisão da medição. Por outro lado, fabricantes de soluções comerciais para o monitoramento de rotação em transportadores tubulares não divulgam métricas de desempenho, e a adoção industrial ainda é pouco explorada [36]. Em nível conceitual, as características-alvo incluem medidas da posição relativa e absoluta da sobreposição da correia, da velocidade de rotação e da relação B/D. Avaliaram-se, então, sete técnicas típicas de medição descritas nos métodos existentes. Concluiu-se que apenas a posição relativa da sobreposição da correia constitui uma característica de medição presente em todas as técnicas, o que favorece o

modelo proposto como uma abordagem promissora para aplicações em larga escala no monitoramento de rotação em transportadores tubulares. A Figura 47 (a-h) apresenta as técnicas típicas de medição empregadas no monitoramento da rotação da correia.

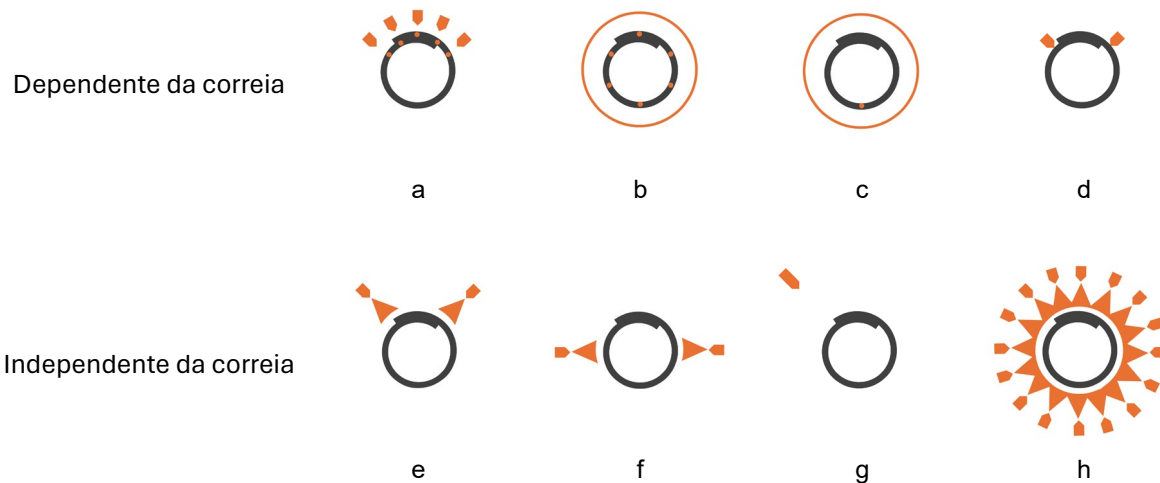


Figura 47. Técnicas típicas de medição para monitorar rotação da correia em transportadores tubulares [59]: marcadores magnéticos e identificadores por radiofrequência no topo da formação tubular [64] (a), marcadores magnéticos distribuídos na largura da correia [79] (b), marcadores magnéticos na base da formação tubular [65] (c), sensores de torque [219,220] (d), sensores laser [77] (e), sensores de detecção e alcance de luz [63] (f), processamento de imagem [221] (g), e o método proposto utilizando sensores de distância infravermelhos (h).

#### 4.4.3. Implementação dos Princípios Tecnológicos

Projetou-se uma arquitetura de rede vertical composta por camadas física, de borda e em nuvem. A camada física considerou a correia de um transportador tubular teórico e um protótipo físico, que constituíram os elementos observáveis. A camada de borda reuniu um controlador IIoT e uma IHM, enquanto a camada em nuvem forneceu os recursos necessários à computação assistida. Além disso, estabeleceu-se uma arquitetura horizontal que dividiu as

camadas física e em nuvem em funções de treinamento e inferência, com a camada de borda atuando como mecanismo de comutação por meio de um gêmeo digital.

Para a digitalização, o método envolveu a comutação inicial do gêmeo digital, por meio de sua IHM, para coletar dados rotulados do protótipo na camada física. A camada em nuvem foi então configurada, na arquitetura vertical, para o ajuste fino de um modelo de linguagem com base nos dados coletados. Esta abordagem compôs a função de treinamento na arquitetura horizontal.

Em seguida, comutou-se o gêmeo digital para coletar dados da aplicação operacional na camada física, enquanto se configurou a camada em nuvem para realizar inferências com o modelo de linguagem ajustado, possibilitando, assim, o monitoramento e a análise dos dados de rotação da correia. Esta abordagem desempenhou a função de inferência na arquitetura horizontal. A Figura 48 ilustra a arquitetura de rede para a digitalização do monitoramento da rotação da correia.

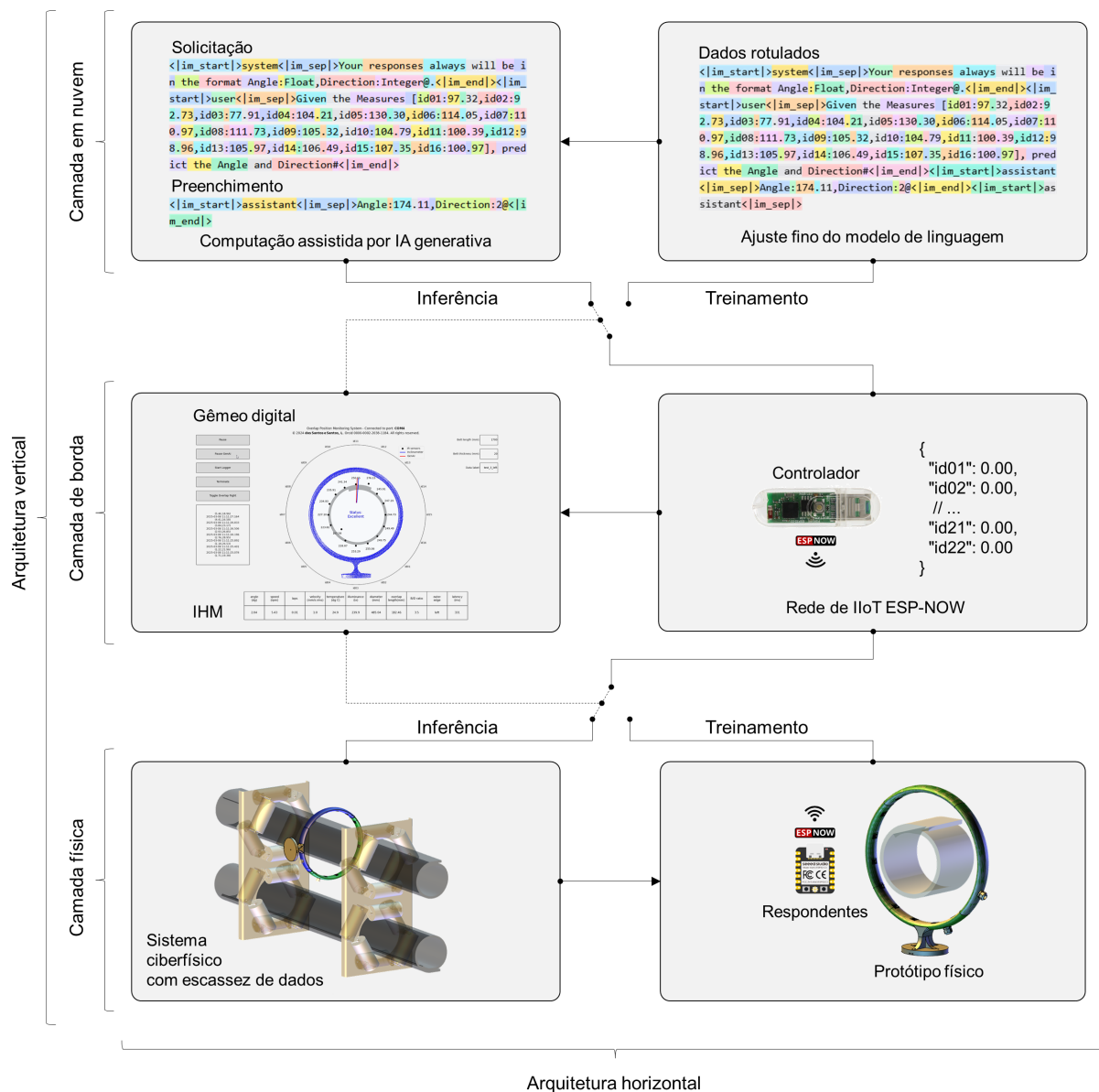


Figura 48. Arquitetura de rede para a digitalização do monitoramento da rotação da correia. Adaptado de [59].

#### 4.4.3.1. Princípio 1: Protótipo Físico para Treinamento

Na implementação, criou-se um gêmeo físico intermediário para endereçar o problema da escassez de dados e anotações associados ao modo de falha da rotação da correia. Projetou-se um nicho hexagonal de madeira com apótema de 170 mm, espessura de 7 mm e altura de 100 mm. Dois discos de madeira, cada um com 152 mm de diâmetro e 12,7 mm de espessura, foram fixados à estrutura hexagonal e vazados para acomodar um eixo de 300 mm × 16 mm,

que foi fixado por meio de um acoplamento de flange rígido. O eixo foi então fixado a um suporte pedestal com um mancal UCF202-16 (FYH *Bearing Units*, Osaka, Japão), um mancal quadrado do tipo flange em ferro fundido, autolubrificado, com furo de 16 mm. Fixou-se uma alavanca manual à extremidade oposta do eixo. Utilizou-se um suporte pedestal móvel, com a linha central do eixo do protótipo posicionada 970 mm acima da superfície do piso.

Para regular a relação B/D da amostra de correia, fixaram-se plataformas elevatórias em cinco das seis faces externas da estrutura hexagonal, cada uma com área de superfície de 90 mm × 90 mm e altura ajustável entre 30 e 90 mm. Imprimiram-se e fixaram-se calços curvos em PLA, com raio de 180 mm e altura máxima de 10 mm, nas superfícies das plataformas elevatórias, para suavizar a conformação da correia em formato tubular. Também se fixou um localizador analógico de ângulo de 360°, como referência visual, na parte superior do nicho hexagonal. Para coletar medições de movimento em 3 eixos, fixou-se um módulo sensor Bluetooth WT901BLECL (WitMotion, Shenzhen, China) na parte inferior do nicho hexagonal. As principais características deste módulo incluem: alimentação por bateria com capacidade de 250 mAh, conexão de carregamento Tipo-C, precisão do inclinômetro de 0,05° nos eixos x e y e resolução do giroscópio de 16 bits, com estabilidade de 0,05°/s. Para alimentação, fixou-se um banco de baterias de 5000 mAh no nicho hexagonal, conectado ao módulo por meio de um cabo de extensão tipo C de 300 mm, com interruptor.

Para a amostra de correia, utilizou-se um lençol de borracha mista, composto por neoprene e borracha de estireno-butadieno (SBR), com 1700 mm de comprimento, 20 mm de espessura e 150 mm de largura. Utilizaram-se uma fivela de travamento automático (autotrava) e abraçadeiras de segurança do tipo C, em aço inoxidável, para manter uma relação B/D fixa e preservar a formação tubular da amostra. As principais características desta amostra incluem: gravidade específica de  $1,70 \pm 0,05$  e dureza de  $70 \pm 5$  Shore A. As propriedades mecânicas incluem: resistência mínima à tração de 35 kg/cm<sup>2</sup>, alongamento mínimo na ruptura de 200%, deformação permanente máxima por compressão de 50% e resistência mínima ao rasgo

angular de 15 kg/cm. De acordo com testes do fabricante, o lençol de borracha contém 10% de polímero de neoprene e apresenta boa resistência ao ozônio, bem como a ácidos e bases diluídos. No entanto, não é recomendado para uso com ácidos, bases, óleos ou solventes concentrados. De acordo com a folha de dados do material, testes de envelhecimento térmico resultaram em uma variação máxima de dureza de 5 pontos, com variações de +10% a -25% na resistência à tração e ao alongamento na ruptura. A faixa de temperatura operacional abrange de -30 °C a +70 °C. A Figura 49 apresenta o protótipo físico do sistema proposto. Ao liberar a fivela automática e as abraçadeiras de segurança, seguida do ajuste das cinco plataformas elevatórias, diferentes relações B/D podem ser definidas. Durante os ensaios, a alavanca manual e o giro do nicho hexagonal permitiram a reprodução de múltiplos cenários de rotação da amostra da correia, fornecendo dados de treinamento inalcançáveis em uma aplicação prática.

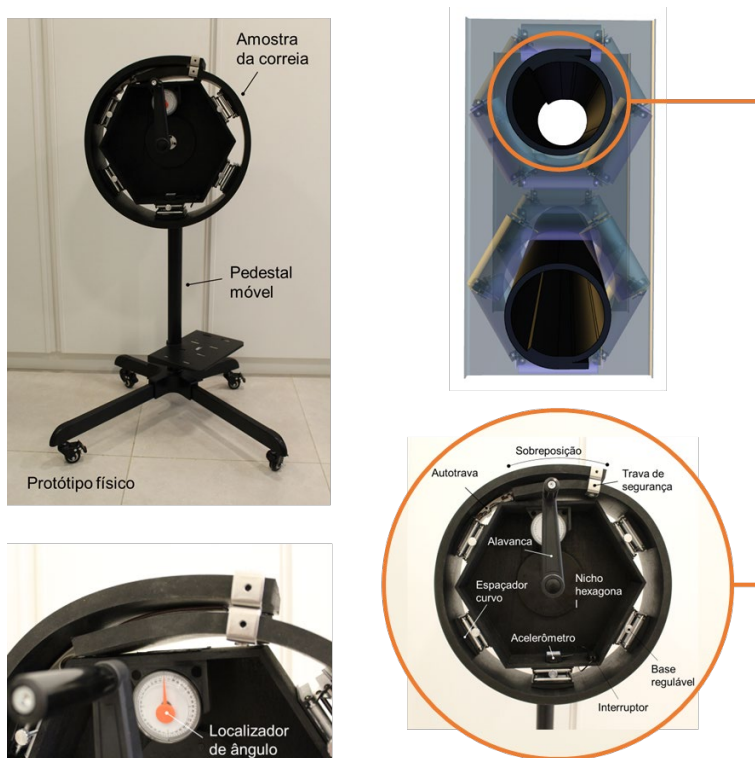


Figura 49. Protótipo físico [59].

#### 4.4.3.2. Princípio 2: Técnicas de Medição Independentes da Correia

Para implementar um sistema de medição sem contato com a correia, projetou-se uma estrutura circular de 16 seções, impressa em PLA, com diâmetro de 775 mm e seção transversal elíptica de 88 mm e 38 mm, respectivamente, nos eixos maior e menor. As 16 seções foram vazadas com espessura de parede de 4 mm. Cada seção foi equipada com um sensor infravermelho analógico para medição de distância, modelo Sharp GP2Y0A21YK0F (Sharp Corporation, Osaka, Japão), com faixa de medição de 100 a 800 mm. Este sensor opera em uma faixa de tensão de 4,5–5,5 V, utiliza um conector JST PH de 3 pinos e apresenta um período de atualização de  $38,3 \pm 9,6$  ms. Conectaram-se os sensores às placas de desenvolvimento IloT Seeed Studio XIAO ESP32C3 (Seeed Studio, Shenzhen, China) e alimentaram-se os módulos por meio de um concentrador USB de 20 portas, utilizando cabos USB-A para USB-C.

Em seguida, fixou-se a estrutura de medição a um suporte articulado de mola a gás. Utilizou-se uma placa circular de 20 kg, revestida com borracha, para estabilizar o conjunto. Posicionou-se o conjunto em uma bandeja plástica móvel com diâmetro de 40,3 cm. Fixou-se uma fonte de alimentação de 90 W, 12 V, 7,5 A à estrutura do suporte articulado, juntamente com componentes adicionais destinados ao processamento multiparâmetro. A Figura 50 apresenta o módulo de medição independente da correia. O movimento completo do aparato permitiu o posicionamento ajustável em relação à amostra da correia, ampliando, assim, as configurações necessárias para uma futura implementação industrial.

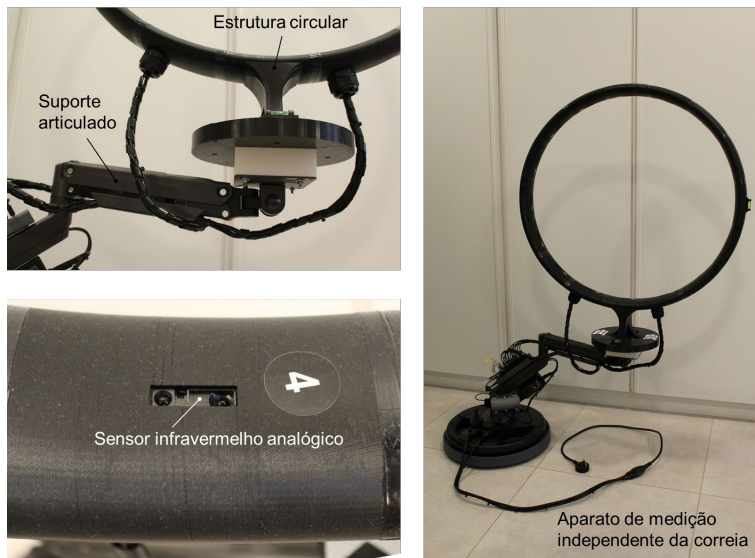


Figura 50. Aparato de medição independente da correia [59].

#### 4.4.3.3. Princípio 3: Processamento Multiparâmetro

Na implementação do processamento multiparâmetro, adicionou-se um motor de vibração de velocidade variável SL-3650C (Shanglinmotor Automations, Dongguan City, China) para simular as frequências de excitação da correia e dos rolos, conforme esperado em aplicações práticas. O dispositivo possui blocos excêntricos nas duas extremidades do eixo, é alimentado por tensão variável de até 12 V e apresenta eficiência máxima de 168,08 g·cm a 3148 rpm. Fixou-se o motor à estrutura do suporte articulado, juntamente com uma fonte de alimentação ajustável de 24 W, 3–12 V, 2 A.

Em seguida, fixou-se um módulo sensor Bluetooth, modelo WTVB01-BT50 (WitMotion, Shenzhen, China), à estrutura do suporte articulado. Utilizou-se este módulo, alimentado por bateria, para medir a vibração em velocidade e a temperatura ambiente. Este módulo apresenta capacidade de bateria de 260 mAh e conexão de carregamento tipo C. O ciclo de detecção e a frequência de corte variam de 1 a 100 Hz, com uma faixa de temperatura operacional de -20 a 60 °C. Para alimentação, conectou-se o módulo ao concentrador USB de 20 portas utilizando um cabo USB-A para USB-C.

Além disso, desenvolveram-se interfaces customizadas para integrar os dispositivos Bluetooth aos módulos de rede configurados para o uso do protocolo ESP-NOW, a fim de conectá-los à rede IIoT. Os dispositivos ESP32 (Seeed Studio, Shenzhen, China) empregados compartilham os protocolos Bluetooth e Wi-Fi usando uma única antena, em modo de coexistência por acesso coordenado. No entanto, para alcançar baixa latência na aplicação, optou-se por usar um par de placas de desenvolvimento IIoT Seeed Studio XIAO ESP32C3 para processar as conexões Bluetooth e Wi-Fi separadamente. Isto foi alcançado ao interconectar os pinos do receptor-transmissor assíncrono universal (UART) e os de alimentação dos dispositivos ESP32 pareados, sem a necessidade de cabeamento adicional. Conectou-se, então, cada par de dispositivos ESP32 diretamente ao concentrador USB de 20 portas, usando adaptadores USB-A para USB-C.

Integrou-se, então, um sensor de iluminação ambiente de 16 bits, modelo VEML 7700 (Vishay Intertechnology, Malvern, PA, EUA), a uma placa de desenvolvimento IIoT Seeed Studio XIAO ESP32C3 por meio do protocolo I2C, para medir a iluminância. Empregou-se um adaptador USB (A para C) para conectar o conjunto diretamente ao concentrador USB de 20 portas, mantendo o sensor de iluminação voltado para cima a 54°. A Figura 51 apresenta o motor de vibração de velocidade variável, as interfaces Bluetooth-para-ESP-NOW customizadas e o sensor de iluminação ambiente.

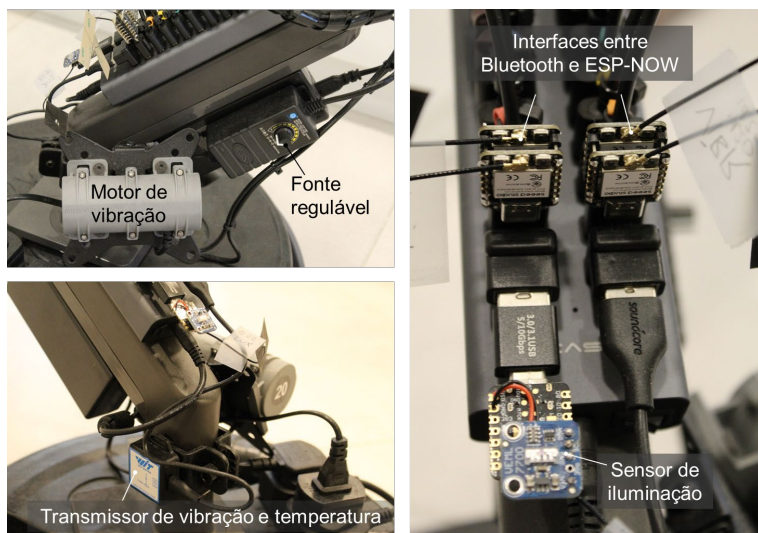


Figura 51. Dispositivos de medição multiparâmetro [59].

#### 4.4.3.4. Princípio 4: Monitoramento das rotações absolutas da correia

Calculou-se o número de rotações da correia a partir das variações de ângulo observadas ao longo de dois ciclos consecutivos de medição. Assumiu-se que a latência de medição era muito menor do que o tempo necessário para uma rotação significativa da correia em aplicações práticas. Adotaram-se as mesmas premissas empregadas por DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [36], que consideraram uma rotação de  $180^\circ$  a 10 rpm como o limiar de falha potencial decorrente da rotação da correia. Assim, o número relativo de rotações foi calculado como um valor em ponto flutuante com dois dígitos, obtido pela divisão do ângulo medido (ou previsto) por  $360^\circ$ , considerando-se o alvo como a posição superior da sobreposição ( $0^\circ$ ). Para computar números absolutos, utilizaram-se incrementos e decrementos para rotações acumuladas nos sentidos horário e anti-horário, respectivamente, considerando a direção de movimento longitudinal da correia como referencial. Implementou-se um algoritmo para detectar quando as leituras ultrapassavam o limite entre  $0^\circ$  e  $359,99^\circ$ . Quando a variação entre ciclos consecutivos era menor que  $-300^\circ$  (por exemplo, de  $357^\circ$  para  $2^\circ$ , resultando em  $-355^\circ$ ), a rotação era considerada no sentido horário, incrementando-se o contador em 1 unidade. Por outro lado, quando a variação excedia  $+300^\circ$  (por exemplo, de  $1^\circ$  para  $359^\circ$ ,

resultando em  $+358^\circ$ ), considerava-se a rotação no sentido anti-horário, decrementando-se o contador em 1 unidade.

Implementaram-se tais cálculos tanto na camada de rede quanto na camada de aplicação. Na camada de rede, utilizou-se a interface Bluetooth-para-ESP-NOW dedicada à medição de movimento em 3 eixos, especificamente a placa Bluetooth, para a obtenção de dados do acelerômetro destinados ao treinamento. Já na camada de aplicação, utilizou-se o ângulo previsto durante a inferência para computar o número absoluto de rotações correspondente. Durante a inferência, utilizou-se um filtro de média móvel ponderada, considerando as cinco últimas medições, com pesos variando de 0,5 a 1,0, o que favoreceu os dados mais recentes. Adicionalmente, implementou-se a execução em processos paralelos para manter a capacidade de resposta do sistema durante a predição do ângulo de sobreposição e da posição da borda externa da correia. A adoção de uma média móvel ponderada penaliza a sincronização de medição, em benefício da mitigação da alucinação no modelo de linguagem e da maior estabilidade da inferência. A Figura 52 apresenta um pseudocódigo da abordagem adotada para monitorar as rotações absolutas da correia.

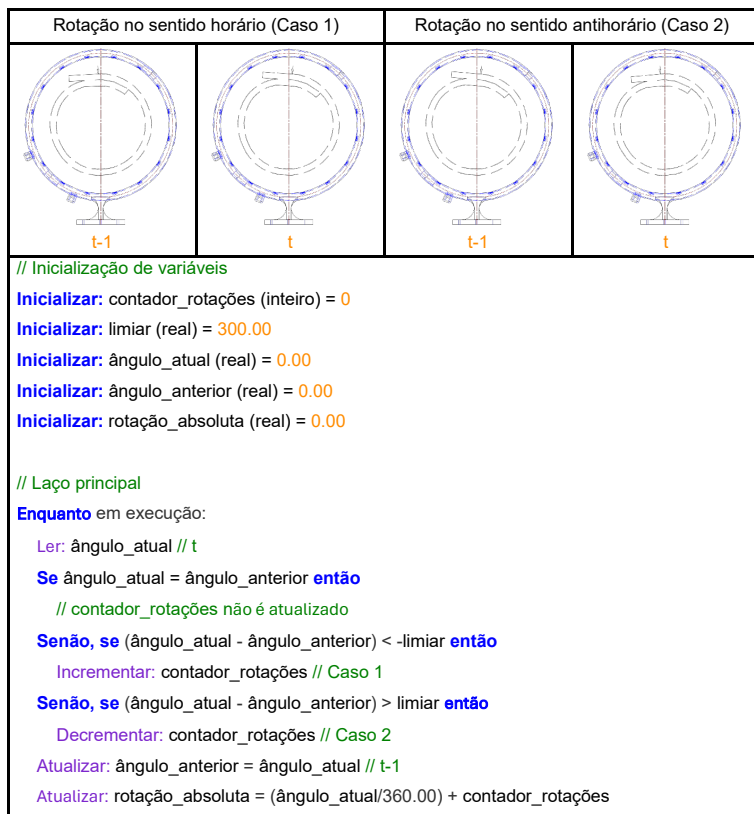


Figura 52. Pseudocódigo para monitorar o número absoluto de rotações da correia [59].

#### 4.4.3.5. Princípio 5: Detecção Oportuna de Estados Inseguros

Na camada de aplicação, implementaram-se quatro preditores de estados inseguros: número absoluto de rotações, relação B/D, comprimento de sobreposição e a posição da borda externa da correia. Adicionaram-se campos numéricos a serem preenchidos pelo usuário do sistema, referentes ao comprimento da amostra (correspondente à largura da correia) e à espessura, ambos em mm. Definiram-se, então, os valores iniciais de 1700 mm e 20 mm, correspondentes à amostra de correia utilizada no experimento. Adicionalmente, utilizou-se um botão na IHM para alternar a posição predefinida da borda externa da correia.

Primeiramente, aplicou-se o critério originalmente proposto por DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [36], que utiliza o número de rotações para indicar a estabilidade operacional da correia tubular da seguinte forma: excelente (menos de 1/24 rotação), boa (entre 1/24 e 1/12 rotações), regular (entre 1/12 e 1/8 rotações), ruim (entre 1/8 e 1/4 rotações), crítica (entre 1/4

e 1/2 rotações) e falha potencial (mais de 1/2 rotação). Aplicou-se, portanto, este critério tanto às rotações no sentido horário quanto às no sentido antihorário. Usando o parâmetro de comprimento da amostra (que representa a largura da correia, B) e o diâmetro calculado da correia tubular (D), calculou-se a razão B/D. Tipicamente, esta relação varia entre 3,5 e 4 [6,7,119,120,134] e pode ser um bom preditor da capacidade de formação tubular da correia quando comparada aos valores de projeto ou operacionais típicos. Isto foi alcançado ao processar as 16 medidas de distância para calcular o diâmetro da formação tubular. Inicialmente, converteram-se as distâncias radiais dos sensores de coordenadas polares para coordenadas cartesianas, considerando o raio do dispositivo. Em seguida, aplicou-se otimização pelo método dos mínimos quadrados para estimar o centro da amostra da correia. Determinaram-se, então, as distâncias entre os pares de sensores opostos (por exemplo, 0° e 180° ou 45° e 225°). Classificaram-se, então, os oito valores pareados e filtraram-se os potenciais valores discrepantes, descartando-se os três primeiros e os três últimos. Finalmente, aplicou-se uma média móvel de 20 amostras para garantir a estabilidade da medição.

Adicionalmente, a medição da variação do diâmetro da correia ao longo do ciclo de vida de um transportador tubular constitui uma boa prática. Trata-se de um bom preditor de baixa capacidade de conformação da correia em formato tubular durante o comissionamento ou de tensão excessiva após a fase de acamamento, caracterizada pela redução da rigidez transversal inicial da correia plana. Neste contexto, adotaram-se as premissas empíricas propostas por DOS SANTOS E SANTOS *et al.* [36], segundo as quais uma redução de 15% no diâmetro da correia representa um limiar de falha potencial devido à elevada flexibilidade transversal ou tensão excessiva na correia. Vale mencionar que a perda de contato entre a correia e os rolos, bem como a estabilidade operacional observada, são fatores-chave na análise e devem ser considerados, conjuntamente com a variação do diâmetro, por engenheiros especialistas.

Em seguida, calculou-se o comprimento da sobreposição das bordas, que constitui um bom preditor da tensão subótima da correia. Usando os parâmetros de comprimento e espessura da amostra, juntamente com o ângulo de sobreposição e o diâmetro calculado, implementou-se uma aproximação espiral de 1.000 passos para representar a formação tubular da amostra no gêmeo digital. Utilizou-se o ângulo resultante dos pontos inicial e final da função espiral para determinar o comprimento do arco da seção de sobreposição. Além disso, empregaram-se transformações em coordenadas cartesianas e otimização pelo método dos mínimos quadrados para posicionar a espiral no centro cartesiano. Em seguida, ajustou-se a posição da espiral com base no centro estimado da amostra da correia, fornecendo uma referência visual dinâmica na IHM.

Finalmente, monitorou-se a posição da borda externa da correia, representada por uma variável discreta com os estados 0 (indefinida), 1 (direita) e 2 (esquerda). Esse indicador permite detectar alternância de sobreposição associada à baixa tensão na correia ou nos rolos de moldagem. O cálculo foi implementado durante o treinamento na camada de aplicação, utilizando a posição predefinida da borda externa conforme selecionada na IHM. Durante a inferência, aplicou-se um filtro para determinar a posição predominante em cada cinco previsões consecutivas. A Tabela 11 resume os critérios-chave para detectar estados inseguros relacionados à rotação da correia em transportadores tubulares.

Tabela 11. Critérios-chave para detectar estados inseguros relacionados à rotação da correia em transportadores tubulares [59].

Critérios	Valores	Diagnósticos	Códigos de Cores
Variação na posição de sobreposição	Até 15° (1/24 rotação)	Excelente	● Azul
	Entre 15° e 30° (1/24 e 1/12 rotação)	Bom	● Verde
	Entre 30° e 45° (1/12 e 1/8 rotação)	Regular	● Amarelo
	Entre 45° e 90° (1/8 e 1/4 rotação)	Ruim	● Laranja
	Entre 90° e 180° (1/4 e 1/2 rotação)	Crítico	● Vermelho
	Maior que 180° (1/2 rotação)		● Marrom
Redução no diâmetro da formação tubular	Maior que 15% do nominal	Falha potencial	-
Alternância de bordas de sobreposição	Maior ou igual a 1 evento		-
Velocidade angular de rotação	Maior ou igual a 10 rpm		-
Torção da correia	Maior ou igual a 360° (1 rotação)	Falha funcional	-

#### 4.4.3.6. Princípio 6: Múltiplos pontos de medição ao longo da rota

No modelo proposto, teorizou-se a implementação de múltiplos pontos de medição ao longo da rota de um transportador tubular, a fim de prevenir falhas funcionais decorrentes da rotação da correia. Propuseram-se pelo menos dois dispositivos de medição posicionados a montante dos tambores motriz e de retorno, para proteger, como mínimo, as zonas de transição de carga e de retorno do transportador tubular. Estas são regiões críticas em que a correia alterna entre as formas plana e tubular, guiada por rolos de moldagem reforçados, com tensão altamente concentrada na cobertura externa da correia tubular.

Atribuiu-se, então, um fator para diferenciar os níveis de criticidade: 2 para rotas longas ou topograficamente complexas e 1,5 para rotas comuns ou altamente estáveis. Esta abordagem permitiu determinar um número ótimo e economicamente eficiente de dispositivos de medição.

Esta análise deve ser realizada por projetistas e engenheiros especialistas, considerando critérios de projeto, restrições técnicas e expertise operacional. Este fator de criticidade indica como dividir os dispositivos entre os segmentos de carga e retorno do transportador em proporções de 1:1 e 1:1/2, respectivamente.

O fundamento lógico para determinar a distância de proteção unitária consistiu em estabelecer uma posição-alvo para o dispositivo de medição, garantindo que a correia pare com segurança antes que a seção rotacionada alcance a zona de transição do transportador em caso de rotações além dos limites toleráveis. Deste modo, quatro distâncias foram consideradas. A primeira correspondeu ao início da maior zona de transição do transportador, adotada como posição-alvo conservadora para a conclusão de uma parada segura da correia. Em seguida, três distâncias adicionais foram definidas com base na velocidade escalar da correia e nos tempos associados aos respectivos eventos. O primeiro componente corresponde ao tempo necessário para a correia rotacionar da posição-alvo para uma posição não tolerável, expresso em termos do número admissível de rotações e da velocidade crítica de rotação. O segundo componente representa o tempo de detecção-resposta, isto é, o intervalo entre a detecção da anomalia e o início do processo de parada segura do transportador. Finalmente, o terceiro componente corresponde ao tempo de parada segura da correia sob desaceleração controlada ou inercial.

Portanto, para calcular a distância de proteção unitária, consideraram-se o comprimento da maior zona de transição do transportador, a velocidade nominal da correia, o número admissível de rotações da correia, o tempo de parada segura da correia, com desaceleração controlada ou inercial, e a latência de detecção-resposta do sistema. O menor inteiro sucessivo resultante da divisão do comprimento desenvolvido do transportador pela distância de proteção unitária indica o número de dispositivos necessários, conforme expresso na Equação (26).

$$n_u = \max \left\{ 2, \left\lceil k_c \left[ \frac{L}{T_z + V_b \left( \frac{60 n_a}{\omega_r} + \tau_{dr} + \tau_s \right)} - 1 \right] \right\rceil \right\}, \quad (26)$$

onde  $n_u$  é o número recomendado de unidades de medição;  $k_c$  é o fator de criticidade;  $L$  é o comprimento desenvolvido do transportador [m];  $T_z$  é o comprimento da maior zona de transição [m];  $V_b$  é a velocidade longitudinal nominal da correia [m/s];  $n_a$  é o número admissível de rotações da correia;  $\omega_r$  é a velocidade crítica de rotação da correia [rpm];  $\tau_{dr}$  é a latência de detecção-resposta [s]; e  $\tau_s$  é o tempo de parada segura da correia, com desaceleração controlada ou inercial [s].

#### 4.4.4. Implementação de Tecnologias Habilitadoras

Para viabilizar a implementação da arquitetura de rede proposta, adotaram-se três tecnologias habilitadoras para interconectar as camadas física, de borda e em nuvem. Empregaram-se redes IIoT para possibilitar a coleta de dados dos elementos físicos observáveis e o envio ao gêmeo digital. Aplicou-se, então, a computação assistida por modelos de linguagem para treinamento com os dados coletados do protótipo físico e para prever o ângulo de sobreposição e a posição da borda externa da correia. Além disso, desenvolveu-se uma IHM para criar um gêmeo digital das entidades físicas e alternar a camada horizontal da rede entre as funções de treinamento e inferência.

##### 4.4.4.1. Tecnologia Habilitadora 1: Redes IIoT

Para a criação de uma rede IIoT, utilizou-se o protocolo de comunicação sem fio ESP-NOW para permitir o processamento multiparâmetro e viabilizar a unidade de medição. Especificou-se um dispositivo USB IIoT, a plataforma de desenvolvimento modelo LILYGO T-Dongle S3 ESP32-S3 (LILYGO, Shenzhen, China), como controlador de rede. A arquitetura de rede foi composta por um controlador e 19 nós físicos, configurados como respondentes. No total, 22 dispositivos ESP32 foram empregados na camada física, devido à abordagem de pareamento

de dispositivos adotada para medir vibração, temperatura ambiente e movimento em três eixos por meio de interfaces Bluetooth customizadas para integração ao protocolo ESP-NOW. Na camada de rede, definiram-se 22 variáveis.

Empregaram-se bibliotecas do Arduino para implementar os algoritmos tanto no controlador de rede quanto nos respondentes utilizados na leitura dos sensores infravermelhos analógicos. Por outro lado, utilizaram-se módulos em MicroPython para programar os dispositivos respondentes empregados nas medições de movimento em três eixos, de vibração, de temperatura ambiente e de iluminância. Usando a IDE do Arduino, versão 2.1.0 (Arduino AG, Turim, Itália), e a biblioteca QuickESPNow versão v0.8.1, que contempla as funções de rede referentes ao protocolo ESP-NOW, implementou-se um algoritmo no controlador de rede para enviar solicitações por difusão, com seu endereço *MAC*, a cada 10 ms. A chamada consistiu em um laço incremental recorrente de 22 números inteiros. Em seguida, implementou-se uma função assíncrona para monitorar as chamadas de retorno e ler os dados dos respondentes, alocando as leituras em um objeto JSON com 22 elementos, por meio da biblioteca ArduinoJson, versão 6.21.2.

A biblioteca QuickESPNow também foi aplicada à transmissão das leituras dos sensores infravermelhos analógicos, por meio de uma função assíncrona semelhante, empregada para monitorar as chamadas do controlador e obter o número inteiro da chamada, além do endereço *MAC*. Aplicou-se, então, uma verificação de autenticação e implementou-se um laço periódico para enviar respostas unidirecionais. Cada resposta consistiu em uma cadeia de caracteres concatenada, composta pelo identificador de rede do respondente e pelas leituras correspondentes. Uma abordagem similar foi empregada em MicroPython para transmitir as medições de movimento em 3 eixos, de vibração, temperatura ambiente e iluminância, usando a IDE Thonny 4.1.4 (Universidade de Tartu, Tartu, Estônia), o interpretador Python 3.10.11 (Python Software Foundation, Wilmington, DE, EUA) e os módulos Network, ESP-NOW e Time. Esta implementação viabilizou o uso do protocolo ESP-NOW, ao mesmo tempo em que

permitiu utilizar as funções em Python necessárias às interfaces customizadas Bluetooth-para-ESP-NOW.

Nas interfaces ESP32 pareadas, utilizaram-se os módulos Time, Bluetooth e Struct, bem como a classe UART do módulo Machine, em MicroPython. Utilizou-se a comunicação UART para enviar as leituras dos módulos ESP32 configurados na rede Bluetooth aos módulos ESP32 configurados como respondentes na rede ESP-NOW. Com base em dados de configuração fornecidos pelo fabricante WitMotion Shenzhen, implementaram-se funções para gerenciamento de eventos por meio de chamadas de retorno, processaram-se as notificações para extrair as leituras e monitorou-se o estado da conexão. Aplicaram-se também mecanismos de reconexão automática sempre que os tempos-limite de comunicação foram excedidos. A Figura 53 e a Tabela 12 ilustram a rede IIoT empregada para monitorar a rotação da correia em aplicações de transportadores tubulares.

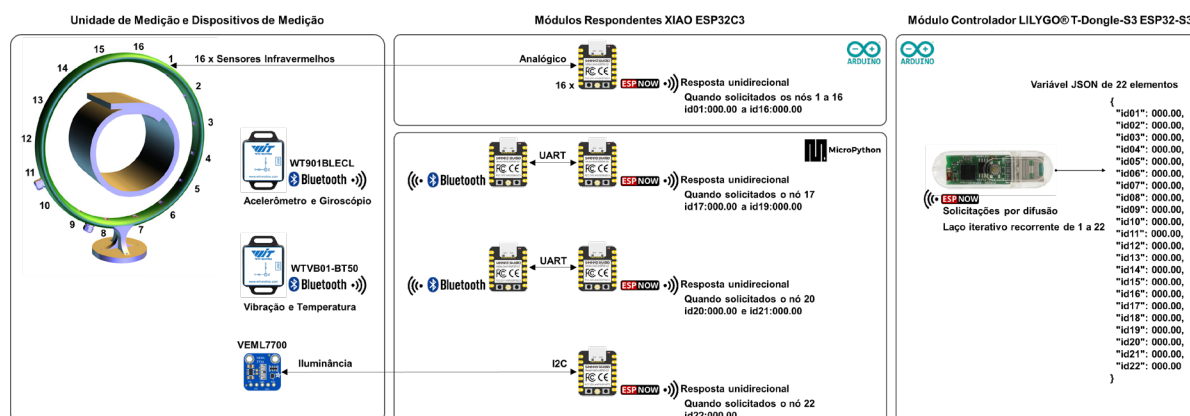


Figura 53. Rede IIoT para monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares [59].

Tabela 12. Dispositivos e variáveis de rede IIoT [59].

Função	Nó físico	Chip	Variável	Ambiente	Medição	Sensores	Acurácia	Tempo de resposta	Dispositivo IIoT	Comunicação
Controlador	1	1	—	Arduino	—	—	—	—	LILYGO T-Dongle S3 ESP32-S3	ESP-NOW → USB
Sensor infravermelho	16	16	16		Distância	GP2Y0A21 YK0F	—	39 ms		Analógica → ESP-NOW
Respondente	Movimento de 3 eixos	1	2	3	Ângulo		±0.05°	100 ms	XIAO ESP32C3	Bluetooth → UART → ESP-NOW
					Velocidade angular	WT901BLE CL	±0.05°/s	100 ms		
	Vibração	1	2	2	Rotações		—	—		
					Vibração em velocidade	WTVB01-BT50	±30 mm/s	100 ms		Bluetooth → UART → ESP-NOW
Sensor de iluminação	1	1	1		Iluminância	VEML 7700	±10%	600 ms		I <sup>2</sup> C → ESP-NOW
Total	19	22	22	—	—	—	—	—	—	—

#### 4.4.4.2. Tecnologia Habilitadora 2: Computação assistida por modelos de linguagem

Para fornecer uma alternativa economicamente eficiente e escalável para viabilizar a digitalização do monitoramento da rotação em transportadores tubulares, empregou-se a computação assistida por modelos de linguagem nesse estudo. As razões para usar esta abordagem incluem a flexibilidade de realizar ajuste fino dos modelos como serviço em servidores remotos, a tendência de redução contínua dos custos por unidade de texto, bem como a possibilidade de usar um protótipo físico, que forneceu um conjunto de dados de treinamento abrangente, favorecendo a convergência do modelo durante o ajuste fino. Para mitigar os problemas conhecidos de generalização ao gerar números em ponto flutuante, selecionou-se o modelo GPT-4o-mini (OpenAI, San Francisco, CA, EUA) para ajuste fino. Para delimitar o experimento, aplicou-se o truncamento, com cinco dígitos, para representar medidas de distância, composto por três dígitos inteiros e duas casas decimais, com base nos achados de YANG *et al.* [218], que identificaram desempenho razoável deste modelo em tarefas numéricas elementares envolvendo números de até oito dígitos.

Após a implementação da camada de rede, programou-se o dispositivo controlador USB ESP32 para processar e imprimir o objeto JSON de 22 elementos por meio de sua porta serial. Em seguida, desenvolveu-se um algoritmo na camada de aplicação, em Python IDLE 3.10.8, para historicizar as leituras de medição para o ajuste fino do modelo de linguagem. Processou-se a cadeia de caracteres em formato JSON com a biblioteca Orjson (versão 3.9.9) e historicizaram-se os dados com o módulo integrado CSV. Adicionalmente, registraram-se as coordenadas cartesianas do centro estimado da amostra de correia, obtidas pela função que calculou a relação B/D, que serviu como medida de calibração do posicionamento relativo entre o protótipo físico e o aparato de medição.

Para criar o texto de solicitação estruturado para fins de treinamento e inferência posterior, concatenaram-se palavras-chave com as 16 medições de distância (representadas como números em ponto flutuante de 2 dígitos), o ângulo de sobreposição (também representado

como números em ponto flutuante de 2 dígitos) e a posição da borda externa da correia (representada como um número inteiro). A estrutura do texto de solicitação foi planejada para aproveitar o conhecimento prévio do modelo pré-treinado. Incorporaram-se palavras-chave específicas da aplicação em inglês, como "Medidas", "Ângulo" e "Direção", para estabelecer uma relação semântica entre os dados de entrada e a saída desejada, maximizando, assim, o uso do mecanismo de atenção do modelo. Adicionaram-se também os caracteres especiais “#” e “@” como sufixo e sequência de parada, respectivamente, para diferenciar as funções do modelo de linguagem, conforme apresentado na Tabela 13. Finalmente, formatou-se a cadeia completa de caracteres em formato JSONL (JSON delimitado por nova linha, em inglês: *JavaScript Object Notation Lines – JSONL*) para o processo de ajuste fino.

Tabela 13. Formatação do texto de solicitação para fins de ajuste fino [59].

Formatação da solicitação	Amostra do aparato de medição (texto original em inglês)	Texto em português
<b>sistema</b>	Your responses always will be in the format Angle:Float,Direction:Integer@.	Suas respostas serão sempre no formato Ângulo:Real,Direção:Inteiro@.
<b>usuário</b>	Given the Measures [id01:97.32,id02:92.73,id03:77.91,id04:104.21,id05:130.30,id06:114.05,id07:110.97,id08:111.73,id09:105.32,id10:104.79,id11:100.39,id12:98.96,id13:105.97,id14:106.49,id15:107.35,id16:100.97], predict the Angle and Direction#	Dadas as medições [id01:97.32,id02:92.73,id03:77.91,id04:104.21,id05:130.30,id06:114.05,id07:110.97,id08:111.73,id09:105.32,id10:104.79,id11:100.39,id12:98.96,id13:105.97,id14:106.49,id15:107.35,id16:100.97], realizar previsão do Ângulo e Direção#
<b>assistente</b>	Angle:174.11,Direction:2@	Ângulo:174.11,Direção:2@
<b>Formatação JSONL</b>	{“messages”: [{“role”: “system”, “content”: “Your responses always will be in the format Angle:Float,Direction:Integer@.”}, {“role”: “user”, “content”: “Given the Measures [id01:97.32,id02:92.73,id03:77.91,id04:104.21,id05:130.30,id06:114.05,id07:110.97,id08:111.73,id09:105.32,id10:104.79,id11:100.39,id12:98.96,id13:105.97,id14:106.49,id15:107.35,id16:100.97], predict the Angle and Direction#”}], “role”: “assistant”, “content”: “Angle:174.11,Direction:2@”}]}	{“mensagens”: [{“função”: “sistema”, “conteúdo”: “Suas respostas sempre serão no formato Ângulo: Real, Direção: Inteiro@”}, {“função”: “usuário”, “conteúdo”: “Dadas as medições [id01:97.32,id02:92.73,id03:77.91,id04:104.21,id05:130.30,id06:114.05,id07:110.97,id08:111.73,id09:105.32,id10:104.79,id11:100.39,id12:98.96,id13:105.97,id14:106.49,id15:107.35,id16:100.97], realizar previsão do Ângulo e Direção#”}], {“função”: “assistente”, “conteúdo”: “Ângulo:174.11,Direção:2@”}]}

Em seguida, criou-se uma tarefa de ajuste fino nos servidores da OpenAI. Utilizou-se o modelo base GPT-4o-mini, um modelo multimodal economicamente eficiente, lançado em julho de 2024, com data de corte de conhecimento em outubro de 2023 e destinado a tarefas especializadas com latência reduzida. Cientes dos potenciais problemas de generalização e de sensibilidade da função de perda decorrentes da adoção de valores contínuos nas cadeias de caracteres de solicitação e de preenchimento, validou-se o modelo ajustado com dados coletados da unidade de medição, em vez de utilizar as métricas de validação resultantes do ajuste fino. Tratou-se de uma decisão pré-planejada, uma vez que o modelo foi configurado experimentalmente para gerar números em ponto flutuante, para os quais se esperavam

diferenças no nível elementar das unidades de texto, o que poderia levar a cálculos de validação imprecisos. Após o treinamento, implementou-se um algoritmo na camada de aplicação para computação assistida, utilizando chamadas via interface de programação de aplicações (em inglês: *Application Programming Interface – API*) ao modelo customizado hospedado nos servidores da OpenAI. Durante a inferência, definiu-se a temperatura do modelo em 0,2 (controle de aleatoriedade), limitou-se o número máximo de unidades de texto por requisição a 200 e estabeleceu-se o tempo limite de resposta em 200 ms.

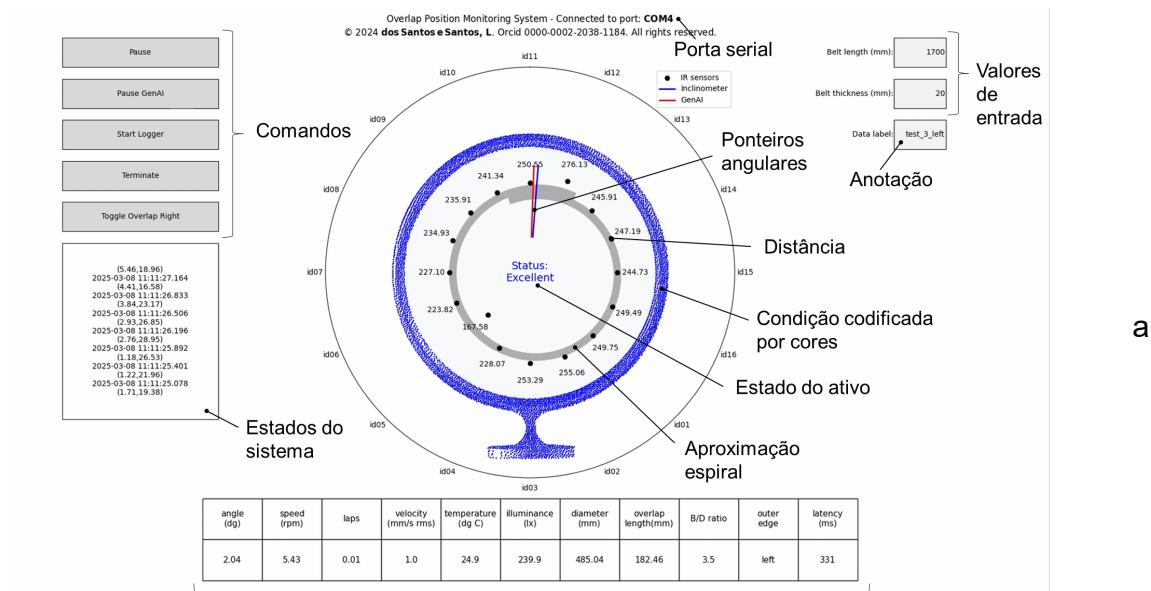
#### 4.4.4.3. Tecnologia Habilitadora 3: Interface Homem-Máquina

Finalmente, desenvolveu-se uma IHM no interpretador Python IDLE 3.10.8 para implementar uma unidade de medição totalmente funcional. A interface incluiu botões para pausar ou retomar a amostragem, ativar ou desativar a computação assistida pelo modelo de linguagem ajustado, registrar os dados em um arquivo CSV, alternar a posição da borda da correia e encerrar a aplicação. Uma janela de texto exibiu, a cada ciclo do programa, o registro com data e hora, juntamente com as coordenadas cartesianas do centro estimado da amostra da correia, obtidas pela função que calculou a relação B/D. Além disso, cada comando executado na IHM gerou mensagens de estado do sistema. Adicionaram-se campos numéricos para preenchimento pelo usuário, incluindo o comprimento da amostra (correspondente à largura da correia) e a espessura, ambos em mm. Definiram-se valores iniciais de 1700 mm e 20 mm, correspondentes à amostra utilizada no experimento. Adicionou-se também um campo de texto livre para permitir anotações com informações contextuais.

Plotou-se um gráfico em coordenadas polares e adicionou-se uma nuvem de pontos concêntrica para representar o aparato de medição. Esse gráfico exibiu as 16 medidas de distância, uma aproximação da geometria da correia por meio de uma função espiral de 1.000 passos e dois ponteiros indicando os ângulos medidos e previstos da posição de sobreposição da amostra. A espiral foi exibida no sentido horário ou anti-horário, conforme a posição da borda externa da correia, selecionada na IHM durante a coleta dos dados de treinamento ou

estimada durante a inferência. Também foi exibida uma tabela com onze leituras: ângulo de sobreposição da correia (0–359,99°), velocidade de rotação (rpm), número absoluto de rotações, vibração em velocidade (mm/s RMS), temperatura (°C), iluminância (lx), diâmetro da formação tubular (mm), comprimento de sobreposição (mm), relação B/D, posição da borda externa (indefinida, direita ou esquerda) e latência (ms).

Na inicialização, o programa listou as portas seriais disponíveis e conectou-se automaticamente ao dispositivo controlador ESP32 via porta USB, exibindo o número da porta serial na IHM. Adicionou-se um rótulo de estado de integridade do ativo no centro da nuvem de pontos. Codificaram-se, por cores, tanto a representação do aparato quanto os rótulos dos estados do sistema: excelente (azul), bom (verde), regular (amarelo), ruim (laranja), crítico (vermelho) e falha potencial (marrom). A Figura 54 (a-g) apresenta a IHM utilizada na integração de informações.



### Multiparâmetro

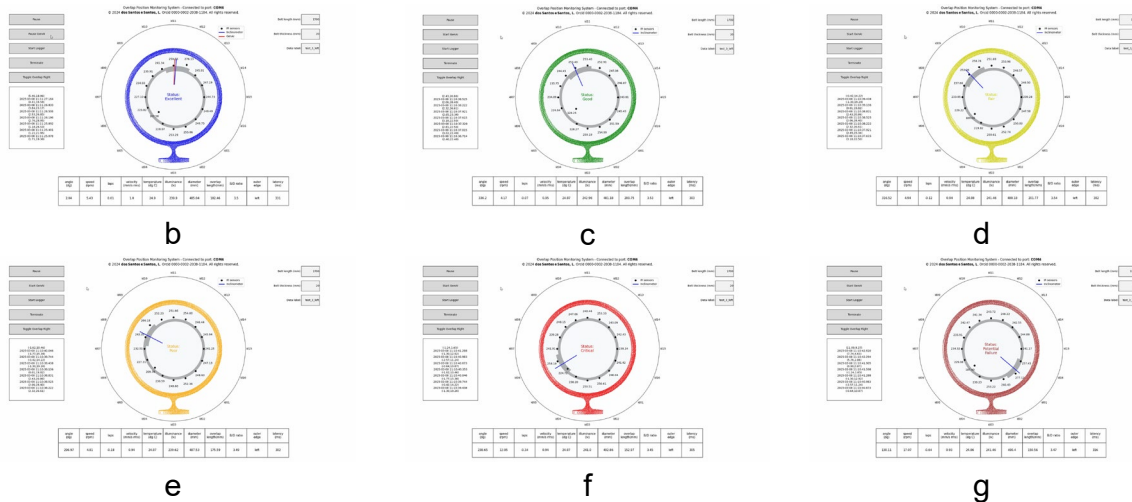


Figura 54. Características-chave da IHM (a) e estados de integridade do ativo codificados por cores [59]: condição excelente (b), boa (c), regular (d), ruim (e), crítica (f) e acima do limiar adotado como falha potencial (g). As imagens (b–g) são exibidas em tamanho e resolução reduzidos para demonstrar o código de cores empregado.

## 4.5. RESULTADOS

Do aparato experimental, coletaram-se 1217 amostras, sendo 909 obtidas no modo de treinamento e 308 no modo de inferência (após o início do modo de IA generativa na IHM). Coletaram-se todas as amostras em ensaios únicos, nos quais a borda externa da correia foi

posicionada à esquerda. Aplicaram-se múltiplas rotações à amostra de correia, em diferentes velocidades angulares, para reproduzir o modo de falha da rotação em vários cenários críticos. O arquivo CSV historicizou com sucesso as variáveis do programa, rotuladas com os termos em inglês da seguinte forma: data e hora, medidas de distância (id01–id16), ângulo de sobreposição medido (id17), velocidade angular (id18), número de rotações (id19), vibração em velocidade (id20), temperatura ambiente (id21), iluminância (id22), largura da correia (id23), espessura da correia (id24), posição da borda externa da correia (id25), diâmetro da formação tubular (id26), comprimento da sobreposição (id27), relação B/D (id28), ângulo de sobreposição previsto (id29), velocidade angular calculada (id30), número calculado de rotações (id31), posição prevista da borda externa da correia (id32), texto de solicitação, texto de preenchimento, anotação, unidade de texto e calibração. A Figura 55 apresenta um sistema multiparâmetro avançado, comissionado e operacional, para monitorar a rotação da correia em transportadores tubulares.



Figura 55. Sistema multiparâmetro avançado para monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares. A IHM é exibida em tamanho e resolução reduzidos para fins de visualização geral [59].

Durante o desenvolvimento do protótipo físico, empregaram-se as características de medição de distância fornecidas na folha de dados do fabricante. Embora a região de linearidade considerasse uma faixa de 100 a 800 mm, as leituras de tensão permitiram medir distâncias a partir de 50 mm por meio de uma transformação polinomial. Para converter leituras de tensão analógica (0–3,5 Vcc) em medições de distância (50–800 mm), implementou-se uma função polinomial de 10º grau. Plotou-se, então, a faixa de medição dos 16 sensores infravermelhos para análise gráfica, a qual revelou uma leitura discrepante no sensor id05, conforme apresentado na Figura 56.

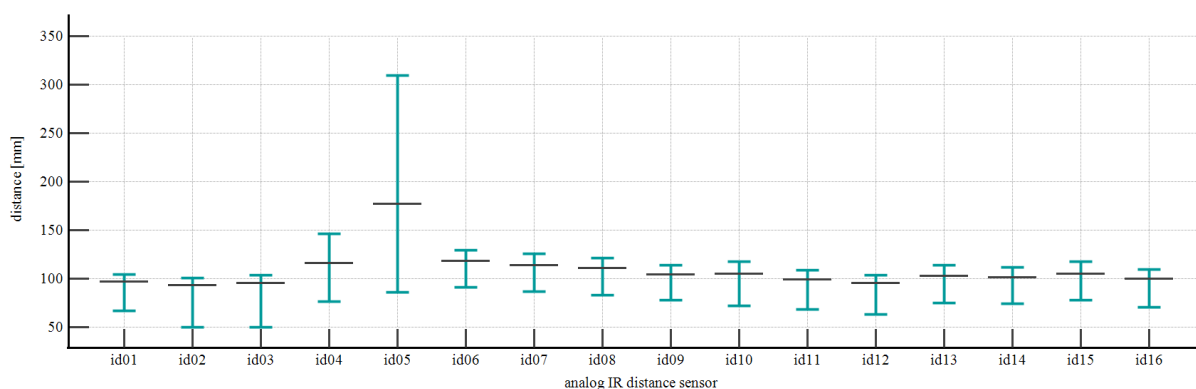


Figura 56. Faixa de medição para sensores de distância infravermelhos [59].

Durante a inferência, a vibração média em velocidade foi de 1,0447 mm/s RMS, com intervalo de confiança de 95% de 1,0365–1,0529 mm/s RMS e faixa de 0,8900–1,2400 mm/s RMS. A temperatura média ambiente foi de 24,9444 °C, com intervalo de confiança de 95% de 24,9418–24,9469 °C e faixa de 24,8900–24,9900 °C. A iluminância média foi de 246,4855 lx, com intervalo de confiança de 95% de 244,9672–248,0038 lx e faixa de 231,6700–290,0700 lx.

O processo de ajuste fino utilizou 400.869 unidades de texto, treinadas ao longo de três épocas, com tamanho de lote igual a 1, multiplicador da taxa de aprendizagem igual a 1,8 e semente definida como 42. Utilizou-se o modelo base GPT-4o-mini com o método de aprendizado autossupervisionado. O tempo total de treinamento foi de 46 min e 02 s,

totalizando 2.727 passos e resultando em uma perda final de treinamento de 0,7935. Compararam-se, então, os valores previstos pelo modelo ajustado às medições realizadas durante a inferência, para fins de validação. Adicionalmente, avaliou-se a latência do aparato de medição tanto no modo de treinamento quanto no de inferência. Compararam-se também os valores calculados do diâmetro da formação tubular e do comprimento de sobreposição com medições manuais da amostra no protótipo físico.

No modo de treinamento, a latência média foi de 301,6022 ms, com intervalo de confiança de 95% de 299,9114 a 303,2931 ms, desvio padrão de 25,7734 ms e valor máximo de 497 ms, observado em 895 amostras. No modo de inferência, a latência média aumentou para 350,1303 ms, com um intervalo de confiança de 95% de 346,8893 a 353,3713 ms, um desvio padrão de 28,8586 ms e o valor máximo de 493 ms, em 307 amostras. A Figura 57 apresenta a latência do aparato de medição nos modos de treinamento e de inferência.

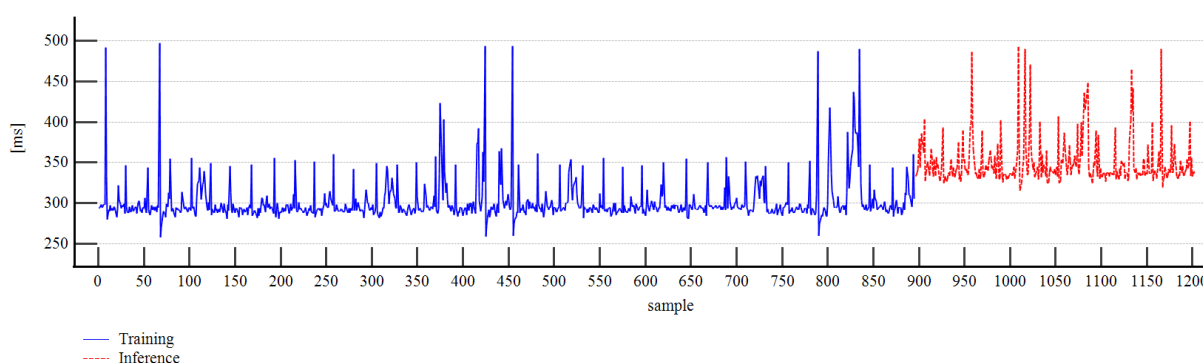


Figura 57. Latência do aparato de medição [59].

Devido à adoção de execução em processos computacionais paralelos e a uma média móvel ponderada para prever o ângulo de sobreposição e a posição da borda externa da correia, implementou-se um deslocamento de 10 ciclos para sincronizar os ângulos medidos e previstos, a fim de comparar os métodos. Para a verificação do deslocamento de sincronização, calculou-se a diferença circular média pareada (em valores absolutos) por deslocamento de ciclo, obtendo-se um mínimo de  $10,5801^\circ$  em 10 ciclos. Além disso,

empregou-se a função seno para realizar comparações pareadas de ângulos e lidar com as transições entre  $0^\circ$  e  $359,99^\circ$ . Em seguida, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade dos dados. A hipótese nula foi rejeitada para os ângulos previstos e medidos, com estatísticas de Kolmogorov-Smirnov de 0,1041 e 0,1435, respectivamente. Em seguida, empregou-se o teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon para amostras pareadas, com base nos conjuntos de valores do seno dos ângulos. Encontrou-se uma diferença estatisticamente significativa entre as observações pareadas, com uma estatística de teste de  $-7,087774$  ( $p < 0,0001$ ). Usando a diferença mediana de Hodges-Lehmann, obteve-se um viés de 0,0578, com intervalo de confiança de 95% de 0,0417–0,0752. O desvio padrão das diferenças entre os valores de seno foi de 0,1471, com precisão de  $\pm 0,2883$ . O coeficiente de correlação foi de 0,9716, com um intervalo de confiança de 95% de 0,9645 a 0,9773. Após aplicar a transformação arcosseno, o viés correspondeu a  $3,3107^\circ$  com um intervalo de confiança de 95% de  $2,3899^\circ$  a  $4,3127^\circ$ . A precisão correspondeu a  $\pm 16,7562^\circ$ .

A Figura 58 (a-d) apresenta os resultados da previsão do ângulo de sobreposição. No ensaio, tanto os valores usados no treinamento quanto os previstos para a borda externa da correia indicaram a posição à esquerda, o que coincide com os valores reais em todas as amostras. É importante notar, porém, que os resultados ficaram limitados pela ausência de amostras com a borda externa posicionada à direita.

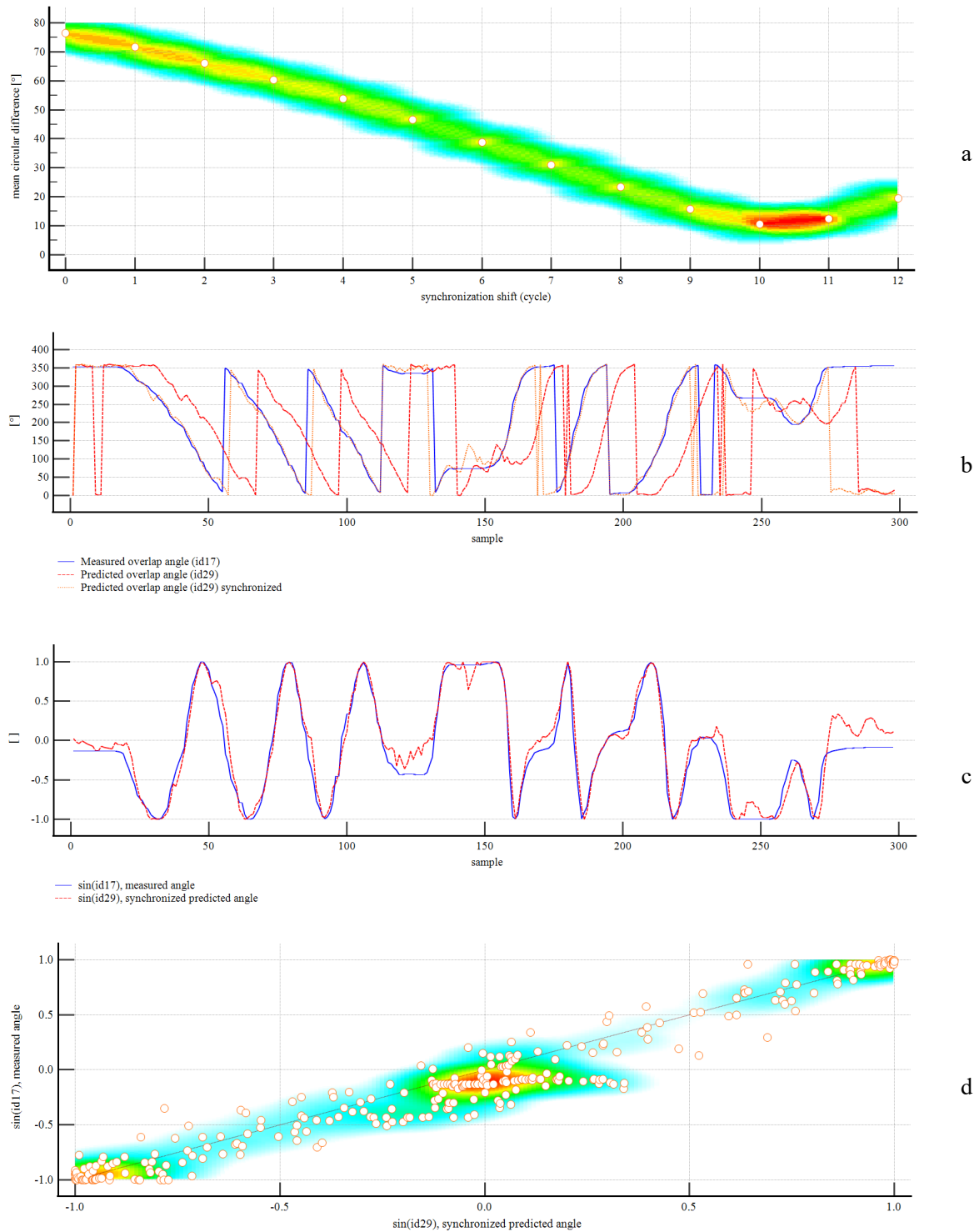


Figura 58. Resultados das medidas de ângulo [59]: sincronização pela diferença circular média pareada absoluta (a); ângulo previsto versus ângulo medido (b); comparação pareada utilizando a função seno (c); diagrama de dispersão após transformação de dados utilizando a função seno (d).

Em seguida, compararam-se os valores calculados do diâmetro da formação tubular e do comprimento da sobreposição às medições manuais realizadas no protótipo físico. Mediu-se o diâmetro externo da amostra da correia, considerando a linha de referência do nicho hexagonal em madeira, em seus três apótemas duplos, e obtiveram-se valores de 471, 479 e 472 mm. Calculou-se, então, o valor médio de 474 mm, adotado como valor de teste na análise estatística. Aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade dos dados calculados do diâmetro. A hipótese nula de distribuição normal foi rejeitada, com estatística de teste de 0,0401. Conseqüentemente, utilizou-se o teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon para uma amostra. Os resultados mostraram uma diferença estatisticamente significativa entre a mediana da amostra e o valor de teste, com uma estatística de teste de  $-30,217965$  ( $p < 0,0001$ ). Usando a diferença mediana de Hodges-Lehmann, obteve-se um viés de  $+13,3850$  mm, com intervalo de confiança de 95% de  $13,1800$  a  $13,5950$  mm. O desvio padrão foi de  $+3,6334$  mm e a precisão de medição, de  $\pm 7,2114$  mm.

Finalmente, mediu-se o comprimento de sobreposição da amostra de correia no protótipo físico, obtendo-se 195 mm, adotados como valor de teste para a análise estatística. Aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a normalidade dos dados. A hipótese nula de distribuição normal foi rejeitada, com estatística de teste de 0,0920. Portanto, utilizou-se o teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon para uma amostra. Os resultados mostraram uma diferença estatisticamente significativa entre a mediana da amostra e o valor de teste, com uma estatística de teste de  $-30,139555$  ( $p < 0,0001$ ). Usando a diferença mediana de Hodges-Lehmann, obteve-se um viés de  $-26,2750$  mm, com intervalo de confiança de 95% de  $-27,0650$  a  $-25,5250$  mm. O desvio padrão foi de  $+12,8335$  mm e a precisão de medição, de  $\pm 25,1536$  mm. A Figura 59 (a-b) os valores calculados do diâmetro da formação tubular e do comprimento de sobreposição, bem como os respectivos valores de teste.

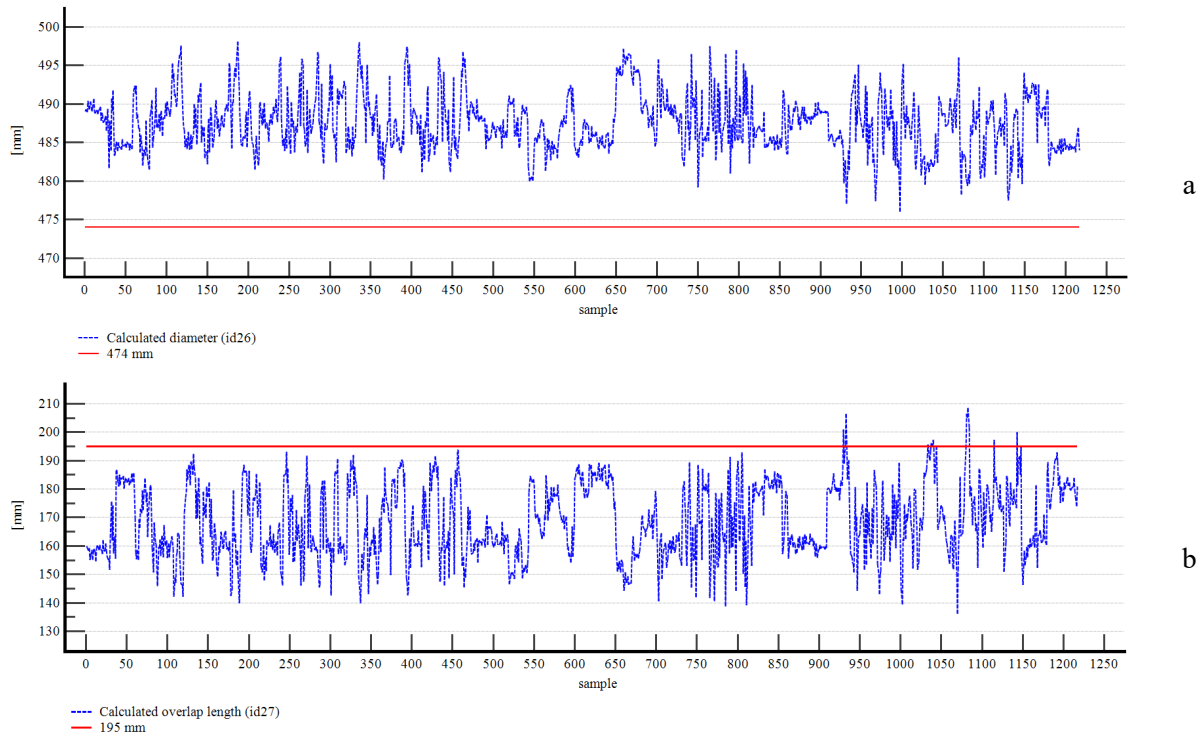


Figura 59. Comparação entre os valores calculados e os de teste do diâmetro da formação tubular (a) e do comprimento de sobreposição (b) [59].

Finalmente, teorizou-se a implementação de múltiplos pontos de medição ao longo da rota. Aplicou-se o modelo proposto a um transportador tubular de longa distância que transporta lama vermelha de bauxita desaguada. O transportador tem um comprimento desenvolvido de 2.213 m, com a maior zona de transição medindo 18 m. A velocidade nominal da correia é de 4,5 m/s e a parada segura com acionamento de frequência variável é configurada para 60 s. Assumiu-se uma velocidade crítica de rotação da correia de 10 rpm, meia rotação da correia como o limite admissível e uma latência de detecção-resposta de 3,5 s para acionar um comando de parada segura. Adotando um fator de criticidade de 1,5, o cálculo sugeriu uma distância de proteção unitária de 317,25 m e nove unidades de medição recomendadas (seis no segmento de carga e três no segmento de retorno). A Figura 60 ilustra o posicionamento recomendado das unidades de medição, segundo a metodologia proposta, em uma aplicação prática. A Tabela 14 resume os cálculos do número recomendado de unidades de medição.



Figura 60. Posicionamento recomendado de unidades de medição para a digitalização do monitoramento da rotação da correia em uma aplicação prática de transportador tubular [59].

Tabela 14. Cálculos do número recomendado de unidades de medição [59].

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Fator de criticidade $k_c$	1,50
Comprimento desenvolvido $L$ [m]	2.213,00
Comprimento da maior zona de transição $T_z$ [m]	18,00
Velocidade escalar da correia $V_b$ [m/s]	4,50
Número admissível de rotações $n_a$	0,50
Velocidade crítica de rotação da correia $\omega_r$ [rpm]	10,00
Latência de detecção-resposta $\tau_{dr}$ [s]	3,50
Tempo de parada segura $\tau_s$ [s]	60,00
Distância de proteção unitária [m]	317,25
Número recomendado de unidades de medição $n_u$	9,00
Unidades de medição no segmento de carga ( $\frac{2}{3}$ )	6,00
Unidades de medição no segmento de retorno ( $\frac{1}{3}$ )	3,00

#### 4.6. DISCUSSÃO

Projetou-se e implementou-se uma bancada de testes, conforme o modelo proposto, para digitalizar o monitoramento da sobreposição da correia em transportadores tubulares. A implementação expandiu os achados de JIANG *et al.* [222], que investigaram a interação entre dados, modelo e serviço para a integração entre gêmeos digitais e IIoT, com foco na conexão entre os elementos observáveis, os gêmeos digitais e a aplicação. Adicionou-se um protótipo à camada física para viabilizar o alinhamento entre o elemento observável e o gêmeo digital em uma aplicação com escassez de dados. O protótipo físico funcionou conforme o pretendido, permitindo a reprodução de múltiplos cenários de rotação da correia que seriam inalcançáveis em uma aplicação prática. A fivela automática e as abraçadeiras de segurança mantiveram uma relação B/D fixa na amostra de correia, sem se observarem anormalidades durante o treinamento ou a inferência.

Empregaram-se medições independentes da correia para mapear 16 pontos ao longo da circunferência da formação tubular. As previsões do modelo de linguagem ajustado apresentaram uma precisão de  $3,3107 \pm 16,7562^\circ$  no ângulo de sobreposição. Essa variação foi influenciada por uma leitura discrepante do sensor do nó de rede 5. Esse comportamento é consistente com a oscilação observada no nível de precisão, uma vez que o modelo pode ter incorporado padrões associados a essas leituras atípicas, como a posição da borda interna da correia. Após a análise do desempenho geral e da faixa de medição dos sensores do mesmo lote, concluiu-se que se tratava de um caso isolado. Para aplicações industriais futuras, recomenda-se substituir os sensores com leituras discrepantes, quando necessário, e retrainar o modelo de linguagem. Ao comparar o nível de precisão obtido com um limiar de rotação da correia de  $180^\circ$  a 10 rpm, condição que caracteriza uma falha potencial, os resultados permanecem promissores. Isso é relevante porque as soluções atuais, em sua maioria, não fornecem rastreabilidade além da parte superior da formação tubular e consideram condições operacionais predominantemente estáveis, o que não reflete as

condições reais de diversos transportadores tubulares. A abordagem de medição sem contato com a correia demonstrou potencial para ampliar a compreensão dos métodos existentes de medição das forças de contato em transportadores tubulares, incluindo as técnicas experimentais desenvolvidas na Universidade Técnica de Košice [10,11,19-26,150], já que a rotação da correia é uma resposta mecânica a forças de contato desiguais.

O processamento multiparâmetro, incluindo medições de vibração em velocidade, temperatura ambiente e iluminância, funcionou conforme o pretendido na prova de conceito. O motor de vibração de velocidade variável simulou as frequências de excitação da correia e dos rolos do transportador, conforme esperado em aplicações práticas. Em aplicações de transportadores tubulares, paradas sazonais ou prolongadas do transportador e armazenamento por longo prazo de peças de reposição são cenários operacionais comuns que podem afetar a condição dos rolos [89]. Além disso, a temperatura ambiente afeta o comportamento viscoelástico da correia tubular, e sensores infravermelhos são sensíveis ao espectro direto da luz solar ou da luz halógena.

Os resultados dos cálculos de diâmetro da formação tubular revelaram um viés de +13,3850 mm, com precisão de  $\pm 7,2114$  mm. Por sua vez, os achados para os cálculos do comprimento de sobreposição apresentaram um viés de -26,2750 mm, com precisão de  $\pm 25,1536$  mm. Estes resultados são consistentes com diferenças sistemáticas que podem exigir ajustes nas implementações industriais futuras. Os sensores infravermelhos analógicos selecionados utilizam detectores sensíveis à posição de montagem, que operam pelo princípio da triangulação. Portanto, o raio do aparato de medição influencia este cálculo. Além disso, um nível de ruído na medição era esperado, pois os diodos emissores de infravermelho dos sensores adjacentes permaneceram energizados durante a operação do aparato. A magnitude da diferença nos níveis de precisão entre o diâmetro da formação tubular e o comprimento da sobreposição resultou dos cálculos empregados. A aproximação espiral de 1.000 passos para calcular o comprimento de sobreposição utilizou valores predefinidos de

comprimento (largura da correia) e de espessura do traçado (espessura da correia), bem como valores dinâmicos do diâmetro calculado. Portanto, o viés positivo nas medidas de diâmetro calculadas resultou em uma subestimação do comprimento de sobreposição. Ao detectar estados inseguros, este nível de precisão é aceitável para aplicações industriais, considerando o limiar adotado de redução de 15% no diâmetro da correia como critério de falha potencial [36]. Nesse estudo de caso, isto representaria uma redução de 71,1 mm, o que seria aproximadamente 10 vezes maior do que o nível de precisão obtido.

Ao monitorar a rotação absoluta da correia, identificaram-se desafios de latência e de sincronização, tais como os destacados por FRASHERI *et al.* [202] e LIU *et al.* [203] em estudos de digitalização. Após alternar do modo de treinamento para o modo de inferência, observou-se que a latência média aumentou de 301,6022 para 350,1303 ms. A implementação de execução em processos paralelos e a adoção de uma média móvel ponderada resultaram em um atraso de 10 ciclos. Esta abordagem foi empregada para aprimorar a mitigação de alucinação, compensar as limitações do modelo de linguagem na geração de números em ponto flutuante e garantir a estabilidade da inferência. Em termos práticos, isto resultou em um tempo de resposta de aproximadamente 3,5 s para detectar estados inseguros associados à rotação da correia. Este é um tempo de resposta admissível para transportadores tubulares de longa distância, que tipicamente levam de vários segundos a minutos para parar após uma solicitação de parada segura. Estas paradas controladas previnem o enchimento excessivo do chute de carga, a obstrução do chute de descarga e o aumento súbito das forças de contato. Volantes de inércia nos tambores motrizes ou o uso de freios do tipo Capstan são soluções comumente empregadas para recuperar a tensão de esticamento da correia nestes casos [151-153].

A rede sem fio controlador-respondente de dispositivos IIoT ESP32 permitiu a aquisição de 22 variáveis do sistema em uma cadeia de caracteres no formato JSON. As interfaces Bluetooth-para-ESP-NOW customizadas também facilitaram a integração de informações ao

possibilitarem a conexão direta com dispositivos de medição Bluetooth comerciais. Explorou-se, então, o uso de modelos de linguagem em condições experimentais controladas para aplicações de medição, visando prever diretamente o ângulo de sobreposição e a posição da borda externa da correia. Incorporaram-se palavras-chave específicas da aplicação para otimizar o uso do mecanismo de atenção do modelo. Esta abordagem é similar à empregada por TAO *et al.* [214] no diagnóstico de falha de rolamentos, na qual as camadas do mecanismo de atenção permaneceram inalteradas durante o ajuste fino.

O processo de ajuste fino, usando o modelo base GPT-4o-mini no método de aprendizado autossupervisionado, alinhou-se à abordagem proposta por RICHEY JR. *et al.* [60] para aplicações logísticas com intervenção humana recorrente e com dados insuficientes. Isto também se alinha com o modelo de gestão de conhecimento orientado por IA apresentado por MASSARO *et al.* [223], que propuseram aprendizado supervisionado para processar dados de sensores alocados a máquinas individuais. SOMMER *et al.* [224] destacaram que muitas empresas evitam ou adiam a digitalização em ambientes industriais devido a restrições de custos, tempo e recursos, incluindo a falta de expertise em tecnologia da informação. Nesse sentido, adotar modelos proprietários facilita a integração, economizando recursos e compensando a falta de expertise por meio de interfaces intuitivas e amigáveis ao usuário. No entanto, vale destacar que vários modelos de código aberto e novas abordagens de ajuste fino estão amplamente disponíveis atualmente, ampliando as possibilidades de inferência local e de soluções customizadas.

A adoção de dispositivos IIoT ESP32 de baixo custo e comoditizados também desempenha papel relevante no apoio à escalabilidade da solução proposta. Abordagens econômicas similares foram empregadas com sucesso em diversas aplicações inovadoras, como a detecção de movimento humano em edifícios inteligentes [225], o registro de leituras geocientíficas para monitoramento geotécnico [226], entre outras. Além disso, a IHM implementada forneceu com sucesso monitoramento multiparâmetro da correia tubular, ao

mesmo tempo em que historicizou os dados de treinamento e inferência. O estado de integridade do ativo, codificado por cores, bem como outras onze variáveis do sistema, permitiram a detecção oportuna de estados inseguros, demonstrando a viabilidade de implantar uma unidade de medição totalmente funcional.

O aparato de medição atingiu com sucesso as características-alvo estabelecidas no modelo de digitalização, incluindo medidas das posições relativas e absolutas da sobreposição da correia, da velocidade de rotação da correia e da relação B/D. Os resultados demonstraram uma vantagem promissora do método proposto em relação a soluções patenteadas e comerciais. Para viabilizar a aplicação industrial em larga escala, são necessários mecanismos de coordenação de malha e de consenso entre múltiplas unidades de IIoT para garantir a rastreabilidade de estados inseguros ao longo do percurso da correia. ROŽANEC *et al.* [227] propuseram uma arquitetura centrada no ser humano para integrar inteligência artificial em aplicações industriais, incluindo, entre outros, módulos de previsão e tomada de decisão, a serem integrados às interfaces do usuário, o que se alinha com a interface homem-máquina proposta. Além disso, integrar computação assistida por modelos de linguagem na nuvem para processar dados de campo requer uma avaliação de risco para garantir a privacidade e segurança dos dados. ALONSO *et al.* [228] desenvolveram um modelo de seis etapas que abrange aspectos como autenticação e autorização de usuários, proteção de dados durante a transferência e o armazenamento, mecanismos de rastreabilidade e monitoramento do sistema e medidas que garantem tanto segurança quanto privacidade. Além disso, a adoção de múltiplos pontos de medição ao longo da rota de um transportador requer uma implementação favorável ao retreinamento do modelo de linguagem, garantindo precisão na medição e manutenibilidade.

#### 4.7. CONCLUSÕES

Demonstrou-se a implementação de um modelo de digitalização para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da sobreposição da correia em transportadores

tubulares, baseado em seis princípios tecnológicos. Para aplicar esses princípios, desenvolveu-se um gêmeo físico intermediário que superou a escassez de dados e de anotações associados ao modo de falha da rotação da correia. Em seguida, usando uma rede sem fio controlador-respondente de dispositivos IIoT ESP32, implementou-se um aparato de medição independente da correia com capacidade multiparâmetro. Desenvolveram-se também interfaces Bluetooth-para-ESP-NOW, que possibilitaram a conexão direta com dispositivos de medição comerciais. Isto foi alcançado por meio de três tecnologias habilitadoras. Propuseram-se, então, critérios-chave para detectar estados inseguros relacionados à rotação da correia em transportadores tubulares e desenvolveu-se um modelo matemático para calcular o número recomendado de dispositivos de medição. Os resultados do processamento multiparâmetro são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Resumo dos resultados do processamento multiparâmetro [59].

<b>Parâmetros</b>	<b>Médias</b>	<b>Faixas</b>
Vibração em velocidade	1,0447 mm/s RMS	0,8900–1,2400 mm/s RMS
Temperatura ambiente	24,9444 °C	24,8900–24,9900 °C
Iluminância	246,4855 lx	231,6700–290,0700 lx

Finalmente, ajustou-se um modelo de linguagem autorregressivo, com base no modelo GPT-4o-mini, utilizando o método de aprendizado autossupervisionado, para prever o ângulo de sobreposição e a posição da borda externa da correia. Incorporaram-se palavras-chave específicas da aplicação para otimizar o mecanismo de atenção do modelo e mitigar as limitações do modelo de linguagem na geração de números em ponto flutuante. A Tabela 16 apresenta os resultados da latência obtidos durante o treinamento e a inferência, e a Tabela 17 resume os resultados das medições de monitoramento da rotação da correia.

Tabela 16. Latência durante o treinamento e inferência [59].

<b>Latência</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Máximo</b>	<b>Amostras</b>
Treinamento	301,6022 ms	25,7734 ms	497 ms	895
Inferência	350,1303 ms	28,8586 ms	493 ms	307

Tabela 17. Resultados do monitoramento da rotação da correia [59].

<b>Medições</b>	<b>Viés</b>	<b>Precisão</b>
Ângulo de sobreposição	3,3107°	±16,7562°
Diâmetro da formação tubular	+13,3850 mm	±7,2114 mm
Comprimento de sobreposição	-26,2750 mm	±25,1536 mm

Usando uma camada de borda em Python, que incluiu uma IHM, monitoraram-se e historicizaram-se dados de treinamento e inferência, incluindo a capacidade de anotação de dados. Implementou-se com sucesso uma exibição de estado de integridade do ativo codificada por cores e o monitoramento de onze leituras-chave, incluindo o ângulo de sobreposição da correia (0–359,99°), velocidade de rotação (em rpm), número de rotações absolutas da correia, vibração em velocidade (em mm/s RMS), temperatura (°C), iluminância (em lx), diâmetro da formação tubular (em mm), comprimento da sobreposição (em mm), relação B/D, a posição da borda externa da correia (se indefinida, lado direito ou esquerdo) e latência (em milissegundos). Finalmente, alcançou-se o objetivo de pesquisa de desenvolver um modelo de digitalização para o monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares.

#### 4.8. TRABALHOS FUTUROS

Este estudo apresentou certas limitações que devem ser abordadas em pesquisas futuras. Primeiramente, ensaios com a borda externa da correia do lado direito ou com diferentes diâmetros podem exigir treinamento adicional do modelo de linguagem ou resultar em níveis de precisão reduzidos. Além disso, um sensor discrepante na medição de distância analógica potencialmente impactou o desempenho geral da unidade de medição; portanto, a substituição sob demanda e o retreinamento do modelo de linguagem são abordagens de manutenção recomendadas para aplicações industriais futuras.

Para estudos futuros, recomenda-se o seguinte:

- Explorar modelos de linguagem de pequeno porte, de código aberto, para avaliar o custo-benefício da inferência local e minimizar a latência de detecção-resposta;
- Validar o modelo teórico para múltiplos pontos de medição ao longo da rota de transportadores tubulares em cenários industriais práticos;
- Ampliar o conjunto de dados de treinamento para cobrir as posições da borda externa tanto do lado direito quanto do lado esquerdo, bem como diferentes diâmetros da correia.

Em trabalhos futuros, o foco será otimizar o equilíbrio entre a detecção de estados inseguros, os custos de implementação e de operação, além de reduzir a latência. O objetivo é aprimorar a aplicação prática do modelo de digitalização para o monitoramento da rotação da correia em transportadores tubulares e ampliar a integração de informações industriais.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da metodologia proposta, analisou-se o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares, detalhando diversas causas e fatores contribuintes que podem levar à rotação incontrolável. Em seguida, estabeleceu-se um índice de estabilidade de sobreposição, que considerou o momento rotacional da correia e o torque de retenção do transportador. Implementou-se, então, a metodologia proposta em um estudo de caso de um transportador tubular de curta distância, no qual a rotação da correia é um modo de falha persistente. Esse estudo possibilitou a identificação de causas raiz e fatores contribuintes para a rotação dessa correia tubular, bem como viabilizou a proposição de planos de ação corretivos e preventivos, um intervalo de substituição otimizado para essa correia e recomendações de alterações de projeto.

O modelo linear proposto é escalável para aplicações em larga escala industrial, desde que observados os seguintes limites: (i) a modelagem da força de formação da correia ao longo do tempo deve considerar as características e propriedades específicas do projeto do fabricante, o que pode exigir ajustes no cálculo; (ii) o perfil de carregamento típico do transportador tubular deve ser levado em conta ao estimar as funções de densidade de probabilidade; e (iii) a simulação das forças de contato da correia em segmentos curvos dependerá do programa de computador especializado utilizado e da experiência dos engenheiros especialistas responsáveis pela modelagem.

Ademais, desenvolveu-se um gêmeo digital, por meio de um equipamento de testes de baixo custo, para mensurar a rotação de uma amostra de correia sobressalente, pertencente a um transportador tubular de longa distância, comissionado e operacional. Implementou-se, então, uma rede de Internet Industrial das Coisas em arquitetura controlador-respondente, utilizando

o protocolo ESP-NOW. Treinou-se um modelo de linguagem autorregressivo para prever a posição de sobreposição dessa amostra de correia, utilizando o modelo Babbage-002 no servidor da OpenAI. A abordagem de ajuste fino, utilizando a mínima solicitação viável, composta apenas pelas variáveis independentes da unidade de medição, mostrou-se adequada para essa aplicação, uma vez que o conjunto de dados de treinamento foi suficientemente abrangente.

O índice de estabilidade proposto considerou um conjunto valioso de parâmetros do equipamento, incluindo a vida útil remanescente da correia. A linearização permitiu a implementação do método de forma simplificada e econômica. Os custos de treinamento e amostragem associados à unidade de medição mostraram-se altamente atrativos para processos de manuseio de granéis sólidos. A unidade monitorou toda a circunferência da correia tubular, fornecendo parâmetros operacionais inéditos e uma nova abordagem para reproduzir a rotação em um ambiente de testes controlado, sem comprometer a segurança ou a integridade dos ativos e do pessoal.

Finalmente, demonstrou-se a implementação de um modelo de digitalização para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da sobreposição da correia em transportadores tubulares. Formularam-se hipóteses sobre os princípios tecnológicos que constituem os requisitos mínimos para viabilizar aplicações industriais em larga escala no monitoramento da rotação da correia. Adotaram-se tecnologias habilitadoras para fomentar a inovação e implementou-se um protótipo físico para abordar a escassez de dados relativa a este modo de falha. Os resultados de medição demonstraram precisão adequada para fins de digitalização e o modelo proposto apresentou potencial para aplicação industrial, com desempenho aceitável para monitoramento em tempo real.

Portanto, alcançaram-se os objetivos desse projeto com base na hipótese de pesquisa estabelecida, por meio do desenvolvimento de um índice de estabilidade e da digitalização do

monitoramento da posição de sobreposição em um transportador tubular. A Tabela 18 apresenta a avaliação qualitativa dos objetivos do projeto de pesquisa.

Tabela 18. Avaliação qualitativa do objetivo geral e dos objetivos específicos da Tese de Doutorado.

<b>Objetivo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Qualificação</b>
Geral	Desenvolver um índice de estabilidade e digitalizar o monitoramento da posição de sobreposição da correia em um transportador tubular	Alcançado
Específico	Analisar o modo de falha da rotação da correia em transportadores tubulares	Alcançado
Específico	Estabelecer um índice de estabilidade de sobreposição e aplicar um estudo de caso em um transportador tubular curvo de curta distância	Alcançado
Específico	Desenvolver um gêmeo digital por meio de um equipamento de teste de baixo custo para mensurar a rotação de uma amostra de correia tubular em ambiente de testes	Alcançado
Específico	Implementar uma rede de Internet Industrial das Coisas em arquitetura controlador-respondente para realizar uma interface homem-máquina em um equipamento de teste	Alcançado
Específico	Treinar um modelo de linguagem autorregressivo para prever a posição de sobreposição de uma correia tubular utilizando um equipamento de teste	Alcançado
Específico	Desenvolver um modelo de digitalização para viabilizar aplicações industriais em larga escala	Alcançado

## REFERÊNCIAS

- [1] OGITA, S. **Estudo Dos Corredores Logísticos do Arco Norte-Diagnostico Preliminar**. 2019. Disponível em: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/324071566827058837> (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). **Desempenho Aquaviário: Resultados do 1º semestre de 2025**. Brasília: ANTAQ, Superintendência de ESG e Inovação (SESGI), Gerência de Estatística e Avaliação de Desempenho (GEA), 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes-da-antag/estatisticos-aquaviarios> (Acessado em 10 de fevereiro de 2026).
- [3] ABBASPOUR, H.; DREBENSTEDT, C. "Environmental comparison of different transportation systems—Truck-Shovel and IPCCs—in open-pit mines by system dynamic modeling". In: **Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018**. Springer International Publishing, pp. 287-305, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_24).
- [4] DE ALMEIDA, C. M.; DE CASTRO NEVES, T.; ARROYO, C. *et al.* "Truck-and-loader versus conveyor belt system: an environmental and economic comparison". In: **Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018**. Springer International Publishing, pp. 307-318, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_25).
- [5] DOS SANTOS E SANTOS, L.; MACÊDO, E. N.; RIBEIRO FILHO, P. R. *et al.* "Belt Rotation in Pipe Conveyors: Failure Mode Analysis and Overlap Stability Assessment". **Sustainability**, v. 15, n. 14, p. 11312, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151411312>.

- [6] CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION (CEMA). **Belt Conveyors for Bulk Materials**. 7<sup>a</sup> ed., Naples, FL: CEMA, 2014.
- [7] ZAMIRALOVA, M. E.; LODEWIJKS, G. "Measurement of a pipe belt conveyor contact forces and cross section deformation by means of the six-point pipe belt stiffness testing device". **Measurement**, v. 70, pp. 232–246, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.045>.
- [8] ZAMIRALOVA, M. E.; LODEWIJKS, G. "Shape stability of pipe belt conveyors: From throughability to pipe-ability". **FME Transactions**, v. 44, pp. 263–271, 2016. <https://doi.org/10.5937/fmet1603263Z>.
- [9] ZHENG, Q. J.; XU, M. H.; CHU, K. W. *et al.* "A coupled FEM/DEM model for pipe conveyor systems: Analysis of the contact forces on belt". **Powder Technology**, v. 314, pp. 480–489, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.070>.
- [10] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLÍKOVÁ, B. *et al.* "Mathematical models for indirect measurement of contact forces in hexagonal idler housing of pipe conveyor". **Measurement**, v. 47, pp. 794–803, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.10.012>.
- [11] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; ANDREJIOVÁ, M. *et al.* "Analysis of influence of conveyor belt overhang and cranking on pipe conveyor operational characteristics". **Measurement**, v. 63, pp. 168–175, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.013>.
- [12] ZAMIRALOVA, M. E. **Design Aspects of Pipe Belt Conveyors**. Tese de D.Sc., Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2017. <https://doi.org/10.4233/uuid:a989069c-54e4-4d80-a30a-a6fb9b333287>.

- [13] HÖTTE, S. **Experimentelle Untersuchungen zu den Normalkräften bei Schlauchgurten**. Garbsen, Alemanha: TEWISS-Technik-und-Wissen-GmbH, 2014.
- [14] SUN, X.; MENG, W.; ZHAO, H. *et al.* "Analysis on the bending stiffness and the form force of the pipe conveyor belt". **Sensors and Transducers**, v. 161, p. 655, 2013.
- [15] ZHANG, Y.; STEVEN, R. "Pipe conveyor and belt: Belt construction, low rolling resistance and dynamic analysis". In: **Proceedings of the SME Annual Meeting**. Seattle, WA, EUA, Fevereiro, 2012.
- [16] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; HONUS, S. *et al.* "Research in placement of measuring sensors on hexagonal idler housing with regard to requirements of pipe conveyor failure analysis". **Engineering Failure Analysis**, v. 116, p. 104703, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104703>.
- [17] WANG, S.; LI, D.; HU, K. "Analysis and experimental study on pressure characteristics of supporting roller group of pipe belt conveyor". **Shock and Vibration**, v. 2019, p. 7061847, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7061847>.
- [18] GUO, S.; HUANG, W.; LI, X. "Normal force and sag resistance of pipe conveyor". **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 33, p. 48, 2020. <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00463-1>.
- [19] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; ANDREJIOVÁ, M. *et al.* "Monitoring of dependences and ratios of normal contact forces on hexagonal idler housings of the pipe conveyor". **Measurement**, v. 64, pp. 168–176, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.055>.
- [20] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; ANDREJIOVÁ, M. *et al.* "Online monitoring of a pipe conveyor. Part I: Measurement and analysis of selected operational

- parameters". **Measurement**, v. 94, pp. 364–371, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.08.018>.
- [21] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; ANDREJIOVÁ, M. *et al.* "Online monitoring of pipe conveyors part II: Evaluation of selected operational parameters for the design of expert system". **Measurement**, v. 104, pp. 1–11, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.011>.
- [22] MOLNÁR, V.; SABOVČÍK, M. "Static testing evaluation of pipe conveyor belt for different tensioning forces". **Open Engineering**, v. 9, pp. 580–585, 2019.  
<https://doi.org/10.1515/eng-2019-0069>.
- [23] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLIKOVA, B. *et al.* "Influence of tension force asymmetry on distribution of contact forces among the conveyor belt and idler rolls in pipe conveyor during transport of particulate solids". **Measurement**, v. 63, pp. 120–127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.12.014>.
- [24] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLÍKOVÁ, B. *et al.* "Statistical approach for evaluation of pipe conveyor's belt contact forces on guide idlers". **Measurement**, v. 46, pp. 3127–3135, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.019>.
- [25] STEHLIKOVA, B.; MOLNÁR, V.; FEDORKO, G. *et al.* "Research about influence of the tension forces, asymmetrical tensioning and filling rate of pipe conveyor belt filled with the material on the contact forces of idler rolls in hexagonal idler housing". **Measurement**, v. 156, p. 107598, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107598>.
- [26] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; HONUS, S. *et al.* "Prediction of contact forces on idler rolls of a pipe conveyor idler housing for the needs of its online monitoring". **Measurement**, v. 139, pp. 177–184, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.008>.

- [27] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLIKOVA, B. *et al.* "Influence of tension and release in piped conveyor belt on change of normal contact forces in hexagonal idler housing for pipe conveyor loaded with material". **Measurement**, v. 84, pp. 21–31, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.001>.
- [28] HÖTTE, S.; OVERMEYER, L.; WENNEKAMP, T. "Form force behaviour of pipe conveyors in different curve radii". **Bulk Solids Handling**, v. 31, pp. 164–169, 2011.
- [29] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLÍKOVÁ, B. *et al.* "Analysis of asymmetrical effect of tension forces in conveyor belt on the idler roll contact forces in the idler housing". **Measurement**, v. 52, pp. 22–32, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.02.035>.
- [30] BOMBASARO, E.; ODDERA, R. "Field measurement of contact forces on rollers for a large diameter pipe conveyor". **Open Engineering**, v. 11, pp. 130–141, 2020. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0014>.
- [31] DOS SANTOS E SANTOS, L.; FILHO, P. R. C. F. R.; MACÊDO, E. N. "Development of idler for measuring indentation rolling resistance in pipe conveyor belts". **Measurement**, v. 153, p. 107413, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107413>.
- [32] DE GRAAFF, R. M. T. **Troughability Testing on Troughed and Pipe Conveyor Belts-Trogbaarheid Testen Met Trog-en Pijp-Transportbanden**. 2012.
- [33] MAKAROV, V.; ZLOTNIKOV, E.; OLT, J. "Determining the load on support rollers the pipe conveyor belt". In: **Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium**. Zadar, Croácia, Novembro, 2017.
- [34] BATWE, S.; JAJU, S.; VAIDYA, S. "Pipe Conveyor". **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 4, pp. 978–983, 2017.

- [35] DMITRIEV, V. G.; EFIMOV, M. S. "Evaluation and method for reducing the angular deviations of the tubular conveyor belt during rotational motion". **Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)**, v. 16, pp. 31–53, 2009.
- [36] DOS SANTOS E SANTOS, L.; RIBEIRO FILHO, P. R. C. F.; MACÊDO, E. N. "Belt rotation in pipe conveyors: Development of an overlap monitoring system using digital twins, industrial Internet of things, and autoregressive language models". **Measurement**, v. 230, p. 114546, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114546>.
- [37] MENDES, D.; GASPAR, P. D.; CHARRUA-SANTOS, F. *et al.* "Integrating TPM and Industry 4.0 to increase the availability of industrial assets: A case study on a conveyor belt". **Processes**, v. 11, p. 1956, 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11071956>.
- [38] MENDES, D. S. F. T.; NAVAS, H. V. G.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. "Improving the performance of a conveyor belt through lean philosophy and Industry 4.0". **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 29, pp. 842-862, 2023. <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2022-0055>.
- [39] MENDES, D.; GASPAR, P. D.; CHARRUA-SANTOS, F. *et al.* "Enhanced real-time maintenance management model - A step toward Industry 4.0 through lean: Conveyor belt operation case study". **Electronics**, v. 12, p. 3872, 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12183872>.
- [40] MENDES, D.; GASPAR, P. D.; CHARRUA-SANTOS, F. *et al.* "Synergies between lean and Industry 4.0 for enhanced maintenance management in sustainable operations: A model proposal". **Processes**, v. 11, p. 2691, 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11092691>.
- [41] FEDORKO, G. "Implementation of Industry 4.0 in the belt conveyor transport". **MATEC Web of Conferences**, v. 263, 2019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926301001>.

- [42] JURDZIAK, L.; BLAZEJ, R.; BAJDA, M. "Conveyor Belt 4.0". In: **Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance**. Springer International Publishing, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97490-3_61).
- [43] SIGOV, A.; RATKIN, L.; IVANOV, L. A. *et al.* "Emerging enabling technologies for industry 4.0 and beyond". **Information Systems Frontiers**, pp. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10213-w>.
- [44] VOß, S. "Successfully using ChatGPT in logistics: Are we there yet?". **International Conference on Computational Logistics**. Springer Nature Switzerland, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43612-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43612-3_1).
- [45] FEDORKO, G.; MOLNÁR, V.; MICHALIK, P. "Keys parameters of digital transformation of continuous transport systems". **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 17, pp. 73–78, 2023. <https://doi.org/10.12913/22998624/163138>.
- [46] MICHALIK, P.; MOLNÁR, V.; FEDORKO, G. "Design and implementation of a dynamic testing rig for testing of pipe conveyor belt and their components". **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 16, pp. 155–164, 2022. <https://doi.org/10.12913/22998624/149525>.
- [47] FEDORKO, G.; MOLNÁR, V.; VASIL', M. *et al.* "Proposal of digital twin for testing and measuring of transport belts for pipe conveyors within the concept Industry 4.0". **Measurement**, v. 174, p. 108978, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108978>.
- [48] LODEWIJKS, G.; LI, W.; PANG, Y. *et al.* "An application of the IoT in belt conveyor systems". In: **Internet and Distributed Computing Systems, Proceedings 9: 9th International Conference, IDCS 2016**. Wuhan, China: Springer International Publishing, 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45940-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45940-0_31).

- [49] CARTER, R. A. "New conveyor tech: Designing for productivity". **Engineering and Mining Journal**, v. 222, pp. 44–47, 2021. <https://www.proquest.com/docview/2585990928>.
- [50] HUANG, Q.; PAN, C.; LIU, H. "A multi-sensor fusion algorithm for monitoring the health condition of conveyor belt in process industry". In: **3rd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)**. IEEE Publications, 2021. <https://doi.org/10.1109/IAI53119.2021.9619194>.
- [51] KLIPPEL, E.; OLIVEIRA, R. A. R.; MASLOV, D. *et al.* "Embedded edge artificial intelligence for longitudinal rip detection in conveyor belt applied at the industrial mining environment". **SN Computer Science**, v. 3, p. 280, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01169-y>.
- [52] KIRJANÓW-BŁAŻEJ, A.; RZESZOWSKA, A. "Conveyor belt damage detection with the use of a two-layer neural network". **Applied Sciences**, v. 11, p. 5480, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11125480>.
- [53] OLCHÓWKA, D.; RZESZOWSKA, A.; JURDZIAK, L. *et al.* "Statistical analysis and neural network in detecting steel cord failures in conveyor belts". **Energies**, v. 14, p. 3081, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113081>.
- [54] GUO, X.; LIU, X.; KRÓLCZYK, G. *et al.* "Damage detection for conveyor belt surface based on conditional cycle generative adversarial network". **Sensors**, v. 22, p. 3485, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22093485>.
- [55] ALHARBI, F.; LUO, S.; ZHANG, H. *et al.* "A brief review of acoustic and vibration signal-based fault detection for belt conveyor idlers using machine learning models". **Sensors**, v. 23, p. 1902, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23041902>.

- [56] STACHOWIAK, M.; KOPERSKA, W.; STEFANIAK, P. *et al.* "Procedures of detecting damage to a conveyor belt with use of an inspection legged robot for deep mine infrastructure". **Minerals**, v. 11, p. 1040, 2021. <https://doi.org/10.3390/min11101040>.
- [57] BORTNOWSKI, P.; GONDEK, H.; KRÓL, R. *et al.* "Forecasting blockades of conveyor transfer points based on vibrodiagnostics". **Measurement**, v. 216, p. 112884, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112884>.
- [58] BORTNOWSKI, P.; GONDEK, H.; KRÓL, R. *et al.* "Detection of blockages of the belt conveyor transfer point using an RGB camera and CNN autoencoder". **Energies**, v. 16, p. 1666, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16041666>.
- [59] DOS SANTOS E SANTOS, L.; RIBEIRO FILHO, P. R. C. F.; MACÊDO, E. N. "A Digitization Framework for Belt Rotation Monitoring in Pipe Conveyor Applications". **Sensors**, v. 25, n. 21, p. 6792, 2025. <https://doi.org/10.3390/s25216792>.
- [60] RICHEY JR, R. G.; CHOWDHURY, S.; DAVIS-SRAMEK, B. *et al.* "Artificial intelligence in logistics and supply chain management: A primer and roadmap for research". **Journal of Business Logistics**, v. 44, pp. 532–549, 2023. <https://doi.org/10.1111/jbl.12364>.
- [61] FEDORKO, G.; MOLNAR, V.; STEHLIKOVA, B. *et al.* "Design of evaluation classification algorithm for identifying conveyor belt mistracking in a continuous transport system's digital twin". **Sensors**, v. 24, p. 3810, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24123810>.
- [62] HASHIMOTO, K. **Method and Machine for Conveying Bulk Material Completely Enclosed Within a Flexible Tubular Endless Belt**. Patente UK GB2061853, 1981. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=GB135898796> (Acessado em 1 de março de 2025).

- [63] FLSMIDTH. **Pipe conveyor belt rotation monitoring system**. Disponível em: <https://video.flsmidth.com/pipe-conveyor-belt-rotation> (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [64] VVV MOST SPOL. S R.O. **Pipe Conveyor Monitoring System**. Disponível em: <https://vvvmost.com/files/KATALOGY-HLAVNI/06---Vyvoj-a-vyzkum.pdf> (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [65] CONTINENTAL AG. **Continental belt monitoring systems: Conveyor belt protection devices and inspection services**. Disponível em: [https://www.continental-industry.com/getmedia/b83f4263-4076-4ab5-a576-cac7fd4a37b3/Continental-Belt-Monitoring-Systems\\_en.pdf](https://www.continental-industry.com/getmedia/b83f4263-4076-4ab5-a576-cac7fd4a37b3/Continental-Belt-Monitoring-Systems_en.pdf) (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [66] WALLACE, J. B.; BASSON, J. F. **Pipe belt orientation monitoring**. Patente WO2016/036945, World Intellectual Property Organization, 2016. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2016036945>.
- [67] WALLACE, J. B.; BASSON, J. **Método para detecção de rasgos Longitudinais e Monitoramento de orientação de correia de Uma Correia transportadora Tubular**. Patente BR112017004309, Brasil, 2022. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=BR217839211>.
- [68] BASSON, J. F.; WALLACE, J. B. **Pipe belt orientation monitoring**. Pedido de Patente AU2015311842, Austrália, 2017. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=AU194404319>.
- [69] WALLACE, J. B.; BASSON, J. F. **Pipe belt orientation monitoring**. Patente EP3188990, European Patent Office, 2017. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=EP200557562>.

- [70] WALLACE, J. B.; BASSON, J. F. **Pipe belt orientation monitoring**. Pedido de Patente CN107074454, China, 2017.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN204731634>.
- [71] WALLACE, J. B.; BASSON, J. F. **Monitoreo de la Orientación de la Cinta de una Correa Transportadora Tubular**. Pedido de Patente CL2017000517, Chile, 2017.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CL250853885>.
- [72] WALLACE, J. B.; BASSON, J. F. **Pipe belt orientation monitoring**. Pedido de Patente IN201717008224, Índia, 2017.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=IN211816538>.
- [73] BASSON, J. F.; WALLACE, J. B. **Pipe belt orientation monitoring**. Patente AU2020200943, Austrália, 2020.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=AU289033849>.
- [74] KÜSEL, B. **Device for monitoring a Tubular belt conveyor system**. Pedido de Patente WO2001002272, World Intellectual Property Organization, 2001.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2001002272>.
- [75] KÜSEL, B. **Device for monitoring Tubular belt monitoring system has optoelectronic system that corrects any deviation in desired overlap of conveyor belt using control rollers**. Patente DE000010029545, Alemanha, 2001.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=DE103483720>.
- [76] KUSEL, B. **Device for monitoring a Tubular belt conveyor system**. Pedido de Patente AU2000062600, Austrália, 2001.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=AU180939068>.

- [77] KÜSEL, B. **Device for monitoring a Tubular belt conveyor system**. Patente US6702103, Estados Unidos da América, 2004.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US40753056>.
- [78] INADA, T. **Pipe conveyor and its twist monitoring method**. Pedido de Patente JP2007204212, Japão, 2007.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP271117433>.
- [79] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **Pipe conveyor belt deformation state detector**. Pedido de Patente WO2008108457, World Intellectual Property Organization, 2008.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008108457>.
- [80] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **Deformed state detecting device for pipe conveyor belt**. Patente JP5133582, Japão, 2012.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP271522488>.
- [81] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **Pipe conveyor belt deformation state detector**. Patente EP2128049, European Patent Office, 2009.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=EP11078928>.
- [82] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **Pipe conveyor belt deformation state detector**. Patente CN101674991, China, 2013.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN83864927>.
- [83] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **Equipamento para detectar o estado de deformação de Uma Correia transportadora de tubulação**. Patente BRPI0808639, Brasil, 2020.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=BR128737349>.
- [84] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **Pipe conveyor belt deformation state detector**. Patente ZA2009/06236, África do Sul, 2010.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=ZA21373211>.

- [85] FURUKAWA, K.; NISHIKITA, Y. **A deformation state detecting apparatus for a pipe-conveyor belt**. Pedido de Patente IN5830/DELNP/2009, Índia, 2010. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=IN211493009>.
- [86] OBA, T.; AIZAWA, S. **Twisted state detection device for pipe conveyor**. Pedido de Patente JP2007210722, Japão, 2007. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP271122640>.
- [87] AMANO, S.; KUROE, K.; ONO, T. **Pipe conveyor device with torsion detector means**. Pedido de Patente JP1996048415, Japão, 1996. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP266775357>.
- [88] ZHAO, L.; SU, J.; ZHONG, Y. *et al.* "BeltLineNet: A shape-prior-guided lightweight network for real-time deviation detection in circular pipe conveyors". **IEEE Sensors Journal**, v. 25, pp. 20024–20036, 2025. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2025.3561351>.
- [89] DOS SANTOS E SANTOS, L.; SOARES, W. K. D. S.; FILHO, P. R. C. F. R. "A method for investigating the influence of rainwater on the useful life of idlers in pipe belt conveyors during seasonal operations". **Engineering Failure Analysis**, v. 141, p. 106702, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106702>.
- [90] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1431-1:2022; Rubber, vulcanized or thermoplastic — Resistance to ozone cracking — Part 1: Static and dynamic strain tests**. Londres: ISO, 2022.
- [91] DOS SANTOS E SANTOS, L.; FILHO, P. R. C. F. R.; MACÊDO, E. N. "Indentation rolling resistance in pipe conveyor belts: A review". **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, p. 230, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02922-9>.

- [92] IMAI, A. "Pipe conveyor Development, benchmark and future trend". **Bulk Solids India**, 2011.
- [93] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1817:2022; Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of the effect of liquids**. Londres: ISO, 2022.
- [94] LODEWIJKS, G. "Determination of rolling resistance of belt conveyors using rubber data: Fact or fiction?". **Bulk Solids Handling**, v. 23, pp. 384–391, 2003.
- [95] LOEFFLER, F. J.; GULLEDGE, J. D., Jr. **Pipe/Tube Conveyors A Modern Method of Coal and Ash Transportation**. Houston, TX: Pennwell Conferences & Exhibitions, 1995.
- [96] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 18766:2014; Rubber, vulcanized or thermoplastic — Low-temperature tests — General introduction and guide**. Londres: ISO, 2014.
- [97] ANDREJIOVÁ, M.; GRINČOVÁ, A.; MARASOVA, D. "Measurement and simulation of impact wear damage to industrial conveyor belts". **Wear**, v. 368–369, pp. 400–407, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.010>.
- [98] HAKAMI, F.; PRAMANIK, A.; BASAK, A. K. "Wear of rubber material in conveyor belt system". In: **Tribology of Elastomers**. Singapura: Springer Nature Singapore, pp. 23–51, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2908-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2908-3_3).
- [99] MARS, W. V.; FATEMI, A. "Factors that affect the fatigue life of rubber: A literature survey". **Rubber Chemistry and Technology**, v. 77, pp. 391–412, 2004. <https://doi.org/10.5254/1.3547831>.
- [100] KANG, W.; LIU, J.; XIONG, W. *et al.* "Basic mechanical and fatigue properties of rubber materials and components for railway vehicles: A literature survey". **Reviews on**

**Advanced Materials Science**, v. 61, pp. 587–610, 2022. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0054>.

[101] WOO, C. S.; PARK, H. S. "Useful lifetime prediction of rubber component". **Engineering Failure Analysis**, v. 18, pp. 1645–1651, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.01.003>.

[102] BROWN, R. P.; FORREST, M. J.; SOULAGNET, G. **Long-Term and Accelerated Ageing Tests on Rubbers**. Rapra Technology Limited, 2000.

[103] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 703:2017; Conveyor belts — Transverse flexibility (troughability) — Test method**. Londres: ISO, 2017.

[104] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 188:2023; Rubber, vulcanized or thermoplastic — Accelerated ageing and heat resistance tests**. Londres: ISO, 2023.

[105] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6943:2017; Rubber, vulcanized — Determination of tension fatigue**. Londres: ISO, 2017.

[106] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 27727:2008; Rubber, vulcanized — Measurement of fatigue crack growth rate**. Londres: ISO, 2008.

[107] CARR, M. J.; ROBERTS, A. W.; WHEELER, C. A. "A revised methodology for the determination of bulk material cohesion and adhesion". **Advanced Powder Technology**, v. 30, pp. 2110–2116, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.06.025>.

[108] GANESAN, V.; ROSENTRATER, K. A.; MUTHUKUMARAPPAN, K. "Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders—A review with implications for

- DDGS". **Biosystems Engineering**, v. 101, pp. 425–435, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.09.008>.
- [109] JOHANSON, J. R. "Know Your Material-How to Predict and Use the Properties of Bulk Solids". **Chemical Engineering**, v. 85, pp. 9–17, 1978.
- [110] CRAIK, D. J.; MILLER, B. F. "The flow properties of powders under humid conditions". **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 10, no. Suppl. 1, pp. 136T–144T, 1958. <https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.1958.tb10392.x>.
- [111] MOREYRA, R.; PELEG, M. "Effect of equilibrium water activity on the bulk properties of selected food powders". **Journal of Food Science**, v. 46, pp. 1918–1922, 1981.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04519.x>.
- [112] SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids**. Berlin/Heidelberg: Springer International Publishing, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-76720-4>.
- [113] FREW, I.; WYPYCH, P. W.; MAR, L. **Different Modes of Dust Testing for Bulk Solids**. University of Newcastle, Callaghan, NSW, Austrália, 2013.
- [114] CHEN, X. L.; WHEELER, C. A.; DONOHUE, T. J. *et al.* "Evaluation of dust emissions from conveyor transfer chutes using experimental and CFD simulation". **International Journal of Mineral Processing**, v. 110–111, pp. 101–108, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.04.008>.
- [115] KESLER, F.; PRENER, M. "DEM: Simulation of conveyor transfer chutes". **FME Transactions**, v. 37, pp. 185–192, 2009.
- [116] AMBRISKO, L.; MARASOVA, D. "Investigation of the ageing influence on the hardness of essential belt component". In: **Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018**. Albena, Bulgária, Julho, 2018.

- [117] HARRISON, A.; ROBERTS, A. W.; ENG, O. M. **Trends in the Application of Troughed Conveyor Belts**. 1983.
- [118] HARRISON, A. "Propagation of longitudinal and transverse cracks on the covers of steel-cord belts". **Mining Technology**, v. 64, p. 738, 1982.
- [119] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI). **VDI 4438; Pipe Conveyor — Design Criteria, Calculation and Safety Instructions (Draft)**. 2019.
- [120] CHINA MACHINERY INDUSTRY FEDERATION (CMIF). **JB/T10380; Pipe Belt Conveyor**. 2<sup>a</sup> ed., Pequim, China: CMIF, 2013.
- [121] ZHANG, Y. "Extended reach: Overland pipe conveyor with low rolling resistance belt". **Bulk Solids Handling**, v. 33, pp. 16–21, 2013.
- [122] MINIKIN, A.; DILFFELD, M.; FISCHER, W. "Residuals removal at Maritza E1—Design, installation and commissioning of a tube belt conveyor". **Bulk Solids Handling**, v. 34, 2014.
- [123] KULAGIN, D. S. "Establishment of bending radius of the tubular conveyor in the horizontal plane by modelling on the computer". **Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)**, v. 16, pp. 114–129, 2009.
- [124] ANDRIANOV, I. V.; VAN HORSSSEN, W. T. "On the transversal vibrations of a conveyor belt: Applicability of simplified models". **Journal of Sound and Vibration**, v. 313, pp. 822–829, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.11.053>.
- [125] SUWEKEN, G.; VAN HORSSSEN, W. T. "On the transversal vibrations of a conveyor belt with a low and time-varying velocity. Part II: The beam-like case". **Journal of Sound and Vibration**, v. 267, pp. 1007–1027, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00219-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00219-0).

- [126] SUWEKEN, G.; VAN HORSSSEN, W. T. "On the transversal vibrations of a conveyor belt with a low and time-varying velocity. Part I: The string-like case". **Journal of Sound and Vibration**, v. 264, pp. 117–133, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01168-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01168-9).
- [127] EFIMOV, M. S. "Determination of the restoring moments from the action of the load during the rotational movement of the tubular conveyor belt". **Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)**, v. 11, pp. 307–309, 2007.
- [128] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 22112–1; Belt Conveyors for Underground Coal Mining—Idlers—Part 1: Dimensions**. Berlin: DIN, 2010.
- [129] ZAMIRALOVA, M. E.; LODEWIJKS, G. "Energy consumption of pipe belt conveyors: Indentation rolling resistance". **FME Transactions**, v. 40, pp. 171–176, 2012.
- [130] WHEELER, C.; MUNZENBERGER, P.; AUSLING, D. *et al.* **Energy efficient belt conveyor design**. In: Tunra Bulk Solids Research Associates, The University of Newcastle, Callaghan, NSW, Austrálie, p. 27, 2018.
- [131] NEUBECKER, I. "An overland pipe conveyor with 22 horizontal and 45 vertical curves connecting coal mine with rail load out". **Bulk Solids Handling**, v. 18, pp. 457–462, 1998.
- [132] ILANKOVIĆ, N.; ŽIVANIĆ, D.; ZUBER, N. "The influence of fatigue loading on the durability of the conveyor belt". **Applied Sciences**, v. 13, p. 3277, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13053277>.
- [133] BARBURSKI, M. "Analysis of the pipe conveyor belt pressure on the rollers on its circuit". **Journal of Industrial Textiles**, v. 45, pp. 1619–1634, 2016. <https://doi.org/10.1177/1528083714567242>.

- [134] WEIGANG, S.; HONGBO, J. **Research Progress and Design Calculation Method of Tubular Belt Conveyor**. 2018.
- [135] GUO, Y.-C.; WANG, S.; HU, K. *et al.* "Optimization and experimental study of transport section lateral pressure of pipe belt conveyor". **Advanced Powder Technology**, v. 27, pp. 1318–1324, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.04.026>.
- [136] HAAK, D. **Overview and Characteristics of Pipe Conveyor Systems and Applications-Een Overzicht En de Karakteristieken van Buisvormige Transportbanden En de Toepassing Daarvan**. 2017.
- [137] ZAMIRALOVA, M. E.; LODEWIJKS, G. "Review of the troughability test ISO 703 for quantifying a uniform transverse bending stiffness for conveyor belts". **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 17, pp. 249–270, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.10.007>.
- [138] FEDORKO, G.; MOLNÁR, V.; ŽIVČÁK, J. *et al.* "Failure analysis of textile rubber conveyor belt damaged by dynamic wear". **Engineering Failure Analysis**, v. 28, pp. 103–114, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.10.014>.
- [139] KOZHUSHKO, G. G.; KOPNOV, V. A. "Fatigue strength functions in shear loading of fabric conveyor belts". **International Journal of Fatigue**, v. 17, pp. 539–544, 1995. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(95\)00037-2](https://doi.org/10.1016/0142-1123(95)00037-2).
- [140] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **EN Din 16974:2016; Conveyor belts: IRR Related to belt width — Requirements, testing**. Berlin: DIN, 2016.
- [141] STANDARDS AUSTRALIA. **AS 1334.13:2017; Methods of testing conveyor and elevator belting Determination of indentation rolling resistance of conveyor belting**. Sydney: Standards Australia, 2017.

- [142] INDRAJATI, I. N.; SETYORINI, I. "Service life prediction of rubber belt conveyor using kinetics approach". **AIP Conference Proceedings**, v. 2197, p. 090002, 2020. <https://doi.org/10.1063/1.5140950>.
- [143] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 5285:2012; Conveyor belts — Guidelines for storage and handling**. Londres: ISO, 2012.
- [144] LEMMI, T. S.; BARBURSKI, M.; KABZINSKI, A. *et al.* "Effect of vulcanization process parameters on the tensile strength of carcass of textile-rubber reinforced conveyor belts". **Materials**, v. 14, p. 7552, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14247552>.
- [145] DOBROTĂ, D. "Vulcanization of rubber conveyor belts with metallic insertion using ultrasounds". **Procedia Engineering**, v. 100, pp. 1160–1166, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.479>.
- [146] MINKIN, A.; JUNGK, A.; HONTSCHA, T. "Design, replacement, and power measurements for the Long Distance pipe conveyor belt at western arch coal skyline Mine, USA". **Advanced Materials & Sustainable Manufacturing**, v. 2, pp. 16–25, 2013.
- [147] AMINKIN; JUNGK, A.; HONTSCHA, T. "Belt replacement at a long distance pipe conveyor: Belt design, installation and power measurements". **Bulk Solids Handling**, v. 32, pp. 16–21, 2012.
- [148] CHEREDNIK, P. N. "Setting the critical value of the belt tension when braking a tubular conveyor". **Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)**, v. 12, pp. 213–219, 2016.
- [149] DMITRIEV, V. G.; SERGEEVA, N. V. "Traction calculation of tubular belt conveyors". **Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)**, v. 16, pp. 144–169, 2009.

- [150] MICHALIK, P.; ZAJAC, J. "Using of computer integrated system for static tests of pipe conveyer belts". In: **Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)**. High Tatras, Eslováquia, pp. 480-485, Maio, 2012. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2012.6228691>.
- [151] JENNINGS, A.; PERRONE, P.; CORNET, J. "Case study: Correcting control problems on Essroc's multidrive station, horizontally curved conveyor". **Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration**, v. 334, pp. 472–476, 2013.
- [152] LODEWIJKS, G. "Two decades dynamics of belt conveyor systems". **Bulk Solids Handling**, v. 22, pp. 124–132, 2002.
- [153] KRUSE, D. J. "Optimizing conveyor take-up systems using dynamic analysis and the implementation of capstans". In: **Bulk Material Handling by Conveyor SME Conference**. 2002.
- [154] STAPLES, P. "The history of pipe conveyors". **Bulk Solids Handling**, v. 22, pp. 210–213, 2002.
- [155] DRENTH, K. F. **The rotation of pipe conveyors**. Relatório de Pesquisa 50303, Delft University of Technology, 2010.
- [156] FEDORKO, G.; IVANČO, V.; MOLNÁR, V. *et al.* "Simulation of interaction of a pipe conveyor belt with moulding rolls". **Procedia Engineering**, v. 48, pp. 129–134, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.495>.
- [157] MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLÍKOVÁ, B. *et al.* "Analysis of a pipe conveyor's idler housing failure due to a missing roller in terms of contact forces". **Engineering Failure Analysis**, v. 127, p. 105527, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105527>.
- [158] POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. **PN-M 46606; Przenośniki Taśmowe—Krażnikit**. 2<sup>a</sup> ed., Varsóvia, Polónia: PKN, 2010.

- [159] SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARDS. **SANS 1313-3; Conveyor Belt Idlers—Part 3: Performance Specifications for Troughed Belt Conveyor Idlers—Metallic and Non-metallic—For Idler Roller Rotational Speeds of up to 750 Revolutions per Minute**. 1<sup>a</sup> ed., Cidade do Cabo, África do Sul: SANS, 2012.
- [160] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 22112-3:2022-12; Belt Conveyors for Underground Coal Mining—Idlers—Part 3: Testing**. Berlim: DIN, 2022.
- [161] CARTER, R. A. "New conveyor tech: Designing for productivity". **Engineering and Mining Journal**, v. 222, pp. 44–47, 2021.
- [162] NUTTALL, A. J. G. **Design Aspects of Multiple Driven Belt Conveyors**. Delft, Holanda: TRAIL Research School, 2007.
- [163] BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 10<sup>a</sup> ed., Nova Iorque, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [164] GABRIEL, P. **Investigation and Modelling of Rubber Friction**. Tese de Ph.D., Queen Mary University of London, Londres, Reino Unido, 2010.
- [165] MAEGAWA, S.; ITOIGAWA, F.; NAKAMURA, T. "Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane". **Tribology International**, v. 92, pp. 335–343, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.014>.
- [166] PERSSON, B. N. J. "Theory of rubber friction and contact mechanics". **The Journal of Chemical Physics**, v. 115, pp. 3840–3861, 2001. <https://doi.org/10.1063/1.1388626>.
- [167] YANG, C.; PERSSON, B. N. J. "Contact mechanics: Contact area and interfacial separation from small contact to full contact". **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 20, p. 215214, 2008. <http://doi.org/10.1088/0953-8984/20/21/215214>.

- [168] KLÜPPEL, M.; HEINRICH, G. "Rubber friction on self-affine road tracks". **Rubber Chemistry and Technology**, v. 73, pp. 578–606, 2000. <https://doi.org/10.5254/1.3547607>.
- [169] WESEMEIER, M. "Theoretical investigations of the forming force on pipe belt conveyor". **Bulk Materials**, v. 3, p. 29, 1997.
- [170] CHERNENKO, V. D. **Calculation of continuous transport systems**. São Petersburgo, Rússia: Politekhnik, 2008.
- [171] BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. <https://doi.org/10.1115/1.1523360>.
- [172] CIAVARELLA, M. "A simplified version of Persson's multiscale theory for rubber friction due to viscoelastic losses". **Journal of Tribology**, v. 140, p. 011403, 2018. <https://doi.org/10.1115/1.4036917>.
- [173] SUNDERARAJAN, C. R. **Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory and Industrial Applications**. Berlim/Heidelberg: Springer Science+Business Media, 1995.
- [174] WAND, M. P.; JONES, M. C. **Smoothing**. 1ª ed., Nova Iorque, NY: Chapman & Hall, 1994. <https://doi.org/10.1201/b14876>.
- [175] CHACÓN, J. E.; DUONG, T. **Multivariate Kernel Smoothing and Its Applications**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.
- [176] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO/TR 7620:2005; Rubber materials — Chemical resistance**. Londres: ISO, 2005.
- [177] MARTÍN, G. **QuickESPNow [Software]**. GitHub, 2023. Disponível em: <https://github.com/gmag11/QuickESPNow> (Acessado em 1 de setembro de 2023).

- [178] BROWN, T.; MANN, B.; RYDER, N. *et al.* "Language models are few-shot learners". **Advances in Neural Information Processing Systems**, v. 33, pp. 1877–1901, 2020. Disponível em: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2020/file/1457c0d6bfcb4967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2020/file/1457c0d6bfcb4967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf).
- [179] SHARP. **GP2Y0E03 Datasheet**. Disponível em: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0e03\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0e03_e.pdf) (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [180] ZIEMANN, V. **A Hands-On Course in Sensors Using the Arduino and Raspberry Pi**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018. <https://doi.org/10.1201/9781351188319>.
- [181] URAZAYEV, D.; EDUARD, A.; AHSAN, M. *et al.* "Indoor performance evaluation of ESP-NOW". In: **IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)**. IEEE Publications, 2023. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223585>.
- [182] ERIDANI, D.; ROCHIM, A.; CESARA, F. N. "Comparative performance study of ESP-NOW, Wi-Fi, bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance". In: **International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)**. IEEE Publications, 2021. <https://doi.org/10.1109/iSemantic52711.2021.9573246>.
- [183] ENCHEVA, S.; TUMIN, S. "Dynamic secure mesh for collaborative nodes of IoT devices". In: **International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering**. Springer Nature Switzerland, Cham, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43815-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43815-8_3).

- [184] ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-C3 Series Datasheet**. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf) (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [185] ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-S3 Series Datasheet**. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf) (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [186] ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-C3 Family Hardware Design Guidelines**. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3\\_hardware\\_design\\_guidelines\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_hardware_design_guidelines_en.pdf) (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [187] ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-S3 Series Hardware Design Guidelines**. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3\\_hardware\\_design\\_guidelines\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_hardware_design_guidelines_en.pdf) (Acessado em 1 de setembro de 2023).
- [188] OZDEMIR, S. **Quick Start Guide to Large Language Models: Strategies and Best Practices for Using ChatGPT and Other LLMs**. Addison-Wesley Professional, 2023.
- [189] SINGH, J. **Natural Language Processing in the Real World: Text Processing, Analytics, and Classification**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2023.
- [190] TUNSTALL, L.; VON WERRA, L.; WOLF, T. **Natural language processing with transformers**. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2022.
- [191] CAI, P.-X.; FAN, Y.-C.; LEU, F.-Y. "Compare encoder-decoder, encoder-only, and decoder-only architectures for text generation on low-resource datasets". In: **Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications**. Springer International Publishing, pp. 216–225, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-90072-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90072-4_23).

- [192] YANG, Z.; DAI, Z.; YANG, Y. *et al.* "XLNet: Generalized autoregressive pretraining for language understanding". **Advances in Neural Information Processing Systems**, v. 32, 2019. Disponível em: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2019/file/dc6a7e655d7e5840e66733e9ee67cc69-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2019/file/dc6a7e655d7e5840e66733e9ee67cc69-Paper.pdf).
- [193] LIN, J.; NOGUEIRA, R.; YATES, A. **Pretrained transformers for text ranking: Bert and beyond**. Springer Nature, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02181-7>.
- [194] DESAI, V. P.; OZA, K. S. "Fine tuning modeling through open AI". **Progression in Science and Technology of Smart Computing PRARUP**, 2021.
- [195] ZONG, C.; XIA, R.; ZHANG, J. **Text Data Mining**. v. 711, Singapura: Springer, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0100-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0100-2_2).
- [196] ROTHMAN, D. **Transformers for Natural Language Processing: Build Innovative Deep Neural Network Architectures for NLP With Python, PyTorch, TensorFlow, BERT, RoBERTa, and More**. Packt Publishing Ltd, 2021.
- [197] WU, H.; DENG, S.; LI, W. *et al.* "Request dispatching for minimizing service response time in edge cloud systems". In: **27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)**. IEEE Publications, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCCN.2018.8487354>.
- [198] EL-SAYED, H.; SANKAR, S.; PRASAD, M. *et al.* "Edge of things: The big picture on the integration of edge, IoT and the cloud in a distributed computing environment". **IEEE Access**, v. 6, pp. 1706–1717, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780087>.
- [199] OUYANG, L.; WU, J.; JIANG, X. *et al.* "Training language models to follow instructions with human feedback". **arXiv preprint arXiv:2203.02155**, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.02155>.

- [200] DZIRI, N.; MILTON, S.; YU, M. *et al.* "On the origin of hallucinations in conversational models: Is it the datasets or the models?". **arXiv preprint arXiv:2204.07931**, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.07931>.
- [201] RAWTE, V.; CHAKRABORTY, S.; PATHAK, A. *et al.* "The Troubling Emergence of Hallucination in Large Language Models—An Extensive Definition, Quantification, and Prescriptive Remediations". **arXiv preprint arXiv:2310.04988**, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.04988>.
- [202] FRASHERI, M.; EJERSBO, H.; THULE, C. *et al.* "Addressing time discrepancy between digital and physical twins". **Robotics and Autonomous Systems**, v. 161, p. 104347, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104347>.
- [203] LIU, W.; HUANG, G.; ZHENG, A. *et al.* "Research on the optimization of IIoT data processing latency". **Computer Communications**, v. 151, pp. 290–298, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.007>.
- [204] SINGH, J.; SINGH, A.; SINGH, H. *et al.* "Implementation and evaluation of a smart machine monitoring system under industry 4.0 concept". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 43, p. 100746, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100746>.
- [205] HAKAMI, A. "Strategies for overcoming data scarcity, imbalance, and feature selection challenges in machine learning models for predictive maintenance". **Scientific Reports**, v. 14, p. 9645, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59958-9>.
- [206] GOODFELLOW, I. J.; POUGET-ABADIE, J.; MIRZA, M. *et al.* "Generative adversarial nets". In: **Advances in Neural Information Processing Systems**. v. 27, pp. 139-144, 2014.

- [207] HOCHREITER, S.; SCHMIDHUBER, J. "Long short-term memory". **Neural Computation**, v. 9, pp. 1735–1780, 1997.  
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
- [208] SOBREIRA, S. G. A.; GOMES, P. H.; FILHO, G. P. R. *et al.* "A data-driven soft sensor for mass flow estimation". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 2515309, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3273658>.
- [209] MATOS, S. N.; PINTO, T. V. B.; DOMINGUES, J. D. *et al.* "An evaluation of iron ore characteristics through machine learning and 2-D LiDAR technology". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 2503411, 2024.  
<https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3342220>.
- [210] LI, J.; GAO, J.; JIAO, S. *et al.* "Eddy current detection of broken steel wires in the core of the conveyor belt based on CutMix-ReliefF-RF". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 74, p. 3545013, 2025.  
<https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3580872>.
- [211] SALIM, I.; DEY, S.; MASOUMI, H. *et al.* "Crack monitoring system for soft rock mining conveyor belt using UHF RFID sensors". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, p. 8003412, 2021.  
<https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3069025>.
- [212] LUO, A.; KOU, Z.; HAN, C. *et al.* "A faster and lighter detection method for foreign objects in coal mine belt conveyors". **Sensors**, v. 23, p. 6276, 2023.  
<https://doi.org/10.3390/s23146276>.
- [213] XU, S.; CHENG, G.; PANG, Y. *et al.* "Identifying and characterizing conveyor belt longitudinal rip by 3D point cloud processing". **Sensors**, v. 21, p. 6650, 2021.  
<https://doi.org/10.3390/s21196650>.

- [214] TAO, L.; LIU, H.; NING, G. *et al.* "LLM-based framework for bearing fault diagnosis". **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 224, p. 112127, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.112127>.
- [215] BAHR, L.; WEHNER, C.; WEWERKA, J. *et al.* "Knowledge graph enhanced retrieval-augmented generation for failure mode and effects analysis". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 45, p. 100807, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100807>.
- [216] ZHANG, C.; ZHANG, H. "The Impact of Generative AI on Management Innovation". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 44, p. 100767, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100767>.
- [217] HUELSE, M.; MUELLER, H.; DÍAZ-RODRÍGUEZ, N. *et al.* "On the disagreement problem in Human-in-the-Loop federated machine learning". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 45, p. 100827, 2025.  
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100827>.
- [218] YANG, H.; HU, Y.; KANG, S. *et al.* **Number cookbook: Number understanding of language models and how to improve it**. arXiv:2411.03766, 2025.
- [219] AIOKE, Y. **Twist detection device and twist correction device for pipe conveyor**. Pedido de Patente JP2007204205, Japão, 2007.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP271117154>.
- [220] KATSUTOSHI, F.; SHINICHIRO, K.; SHINICHI, S. **Method and device for detecting twist in pipe conveyor**. Patente JP3156168, Japão, 2001.  
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP266096635>.

- [221] MIYAHARA, M.; YOKOZUKA, T. **Rolling measuring method and device for pipe conveyor and method for avoiding rolling**. Patente JP4432550, Japão, 2010. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=JP270421686>.
- [222] JIANG, Z.; GUO, Y.; WANG, Z. "Digital twin to improve the virtual-real integration of industrial IoT". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 22, p. 100196, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100196>.
- [223] MASSARO, A.; SANTARSIERO, F.; SCHIUMA, G. "Advanced Electronic Controller Circuits Enabling Production Processes and AI-driven KM in Industry 5.0". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 45, p. 100841, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100841>.
- [224] SOMMER, M.; STJEPANDIĆ, J.; STOBRAWA, S. *et al.* "Automated generation of digital twin for a built environment using scan and object detection as input for production planning". **Journal of Industrial Information Integration**, v. 33, p. 100462, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100462>.
- [225] NATARAJAN, A.; KRISHNASAMY, V.; SINGH, M. "A machine learning approach to passive human motion detection using WiFi measurements from commodity IoT devices". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 2512510, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3272374>.
- [226] KHAN, M. W.; MARTIN, J.; LIM, M. "Instrumentation of low-cost IoT-agnostic data-capturing platform with enhanced sampling and bandwidth capabilities for subsurface characterization". **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 3002710, 2024. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3472889>.
- [227] ROŽANEC, J. M.; NOVALIJA, I.; ZAJEC, P. *et al.* "Human-centric artificial intelligence architecture for Industry 5.0 applications". **International Journal of Production**

**Research**, v. 61, pp. 6847–6872, 2023.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2138611>.

[228] ALONSO, R.; HABER, R. E.; CASTAÑO, F. *et al.* "Interoperable software platforms for introducing artificial intelligence components in manufacturing: A meta-framework for security and privacy". **Heliyon**, v. 10, p. e26446, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26446>.

APÊNDICE A – Glossário de tradução de termos técnicos

<b>Português</b>	<b>Inglês</b>
(arquitetura) codificador-decodificador	<i>Encoder-decoder</i>
(Arquivos eletrônicos de texto com) valores separados por vírgula CSV	<i>Comma-separated values – CSV</i>
(configuração de rede) multiponto-a-multiponto	<i>Many-to-many</i>
(configuração de rede) ponto-a-multiponto	<i>One-to-many</i>
(estratégias que envolvem) iterações humanas	<i>human-in-the-loop</i>
(formato) JSON delimitado por nova linha	<i>JavaScript Object Notation Lines – JSONL</i>
(mecanismo de) atenção	<i>Attention</i>
(mecanismo de) autoatenção	<i>Self-attention</i>
(modo de comunicação) por difusão	<i>Broadcast</i>
(modo de comunicação) unidirecional	<i>Unicast</i>
(operações por) escavadeira e caminhões	<i>Truck-shovel</i>
(sistemas de) britagem e transportadores de correia	<i>In-Pit Crushing and Conveying</i>
(tensão de corte de dreno) VDD	<i>Drain power voltage</i>
Acesso múltiplo com detecção de portadora	<i>Carrier sense multiple access – CSMA</i>
Acurácia (do treinamento)	<i>Training accuracy</i>
Ajuste excessivo do modelo	<i>Model overfitting</i>
Algoritmo detector de bordas de Canny	<i>Canny edge detection algorithm</i>
Análise dos modos de falha e efeitos	<i>Failure Mode and Effects Analysis – FMEA</i>
Bluetooth de baixo consumo de energia	<i>Bluetooth Low Energy – BLE</i>
Borracha vulcanizada – Determinação da fadiga por tensão (ISO 6943:2017)	<i>Rubber, vulcanized – Determination of tension fatigue (ISO 6943:2017)</i>
Borracha vulcanizada – Medição da taxa de crescimento de trincas por fadiga (ISO 27727:2008)	<i>Rubber, vulcanized – Measurement of fatigue crack growth rate (ISO 27727:2008)</i>
Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Determinação do efeito de líquidos (ISO 1817:2022)	<i>Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of the effect of liquids (ISO 1817:2022)</i>
Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Envelhecimento acelerado e testes de resistência ao calor (ISO 188:2023)	<i>Rubber, vulcanized or thermoplastic – Accelerated ageing and heat resistance tests (ISO 188:2023)</i>
Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Resistência à fissura por ozônio – Parte 1: Teste de deformação estática e dinâmica (ISO 1431-1:2022)	<i>Rubber, vulcanized or thermoplastic – Resistance to ozone cracking – Part 1: Static and dynamic strain testing (ISO 1431-1:2022)</i>
Borracha, vulcanizada ou termoplástica – Teste à baixa temperatura – Introdução geral e guia (ISO 18766:2014)	<i>Rubber, vulcanized or thermoplastic – Low temperature testing – General introduction and guide (ISO 18766:2014)</i>
Canais de conversão analógico-digital	<i>Analog-to-digital converter – ADC</i>

<b>Português</b>	<b>Inglês</b>
Capacidade de compreensão e de processamento numérico (em um modelo de linguagem)	<i>Numerical Understanding and Processing Abilities – NUPA</i>
Cartão (de memória) TF	<i>Transflash</i>
Chamadas unidirecionais	<i>Unicast calls</i>
Codificação posicional	<i>Positional encoding</i>
Componentes eletrônicos do tipo sistema em um chip	<i>System-on-Chips – socs</i>
Conexão padrão JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
Conversão das cadeias de caracteres em unidades de texto	<i>Tokenization</i>
Correias transportadoras – Diretrizes para armazenamento e manuseio (ISO 5285:2012)	<i>Conveyor belts – Guidelines for storage and handling (ISO 5285:2012)</i>
Correias transportadoras – Flexibilidade transversal – Método de teste (ISO 703:2017)	<i>Conveyor belts – Transverse flexibility (troughability) – Test method (ISO 703:2017)</i>
Correias transportadoras – Resistência ao rolamento por indentação relacionada à largura da correia – Requisitos, testes (DIN EN 16974:2016)	<i>Conveyor belts – Indentation rolling resistance related to belt width – Requirements, testing (DIN EN 16974:2016)</i>
Disparo único	<i>One-shot</i>
Disparo zero	<i>Zero-shot</i>
Emendas em dedo	<i>Finger splices</i>
Endereço de controle de acesso à mídia	<i>Media Access Control – MAC</i>
Formato de bate-papo conversacional	<i>Conversational chat format</i>
Geração aumentada por recuperação com gráfico de conhecimento	<i>Knowledge graph-enhanced retrieval-augmented generation – KG-RAG</i>
Gráficos de caixa	<i>Box-and-Whisker plot</i>
Gráficos quantil-quantil	<i>Quantile–quantile plot, Q – Q plot</i>
Modelo de linguagem de grande porte	<i>Large Language Model – LLM</i>
Identificação por radiofrequência em ultra-alta frequência	<i>Ultra-High Frequency Radio Frequency Identification – UHF-RFID</i>
Identificadores por radiofrequência RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
Imagem PNG	<i>Portable network graphic</i>
Índice de estabilidade de sobreposição	<i>Overlap Stability Index – OSI</i>
Iniciar/Pausa	<i>Start/Pause</i>
Inteligência artificial generativa – IA generativa	<i>Generative Artificial Intelligence – GenAI</i>
Interface de comunicação serial SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
Interface de programação de aplicações	<i>Application Programming Interface – API</i>
Internet das Coisas	<i>Internet of Things – IoT</i>
Internet Industrial das Coisas	<i>Industrial Internet of Things – IIoT</i>
Inversor de frequência variável	<i>Variable-frequency drive – VFD</i>
Macrodados	<i>Big data</i>
Materiais de borracha – Resistência química (ISO/TR 7620:2005)	<i>Rubber materials – Chemical resistance (ISO/TR 7620:2005)</i>

<b>Português</b>	<b>Inglês</b>
Memória volátil SRAM	<i>Static random-access memory</i>
Métodos de teste de correias transportadoras e elevadoras – Determinação da resistência ao rolamento por indentação de correias transportadoras (AS 1334.13:2017)	<i>Methods of testing conveyor and elevator belting – Determination of indentation rolling resistance of conveyor belting (AS 1334.13:2017)</i>
Modelo de aprendizagem de máquina	<i>Machine-learning model</i>
Modelo de interconexão de sistemas abertos	<i>Open Systems Interconnection – OSI</i>
Modulação por largura de pulso	<i>Pulse-width modulation – PWM</i>
Número de épocas	<i>Number of epochs</i>
Nível de prontidão tecnológica	<i>Technology Readiness Level – TRL</i>
Objeto de notação em <i>javascript</i>	<i>Javascript Object Notation – JSON</i>
Pares solicitação-preenchimento	<i>Prompt-completion pairs</i>
Perdas do treinamento	<i>Training loss</i>
Pequenas e médias empresas	<i>Small and Medium-sized Enterprise – SMEs</i>
Pinos de uso geral	<i>General-purpose input/output – GPIO</i>
Portas UART para comunicação serial assíncrona	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i>
Poucos disparos	<i>Few-shots</i>
Preenchimento	<i>Completion</i>
Rede adversária generativa	<i>Generative Adversarial Network – GAN</i>
Rede neural com memória de curto e de longo prazo	<i>Long Short-Term Memory – LSTM</i>
Rede neural convolucional	<i>Convolutional neural network</i>
Rede neural profunda	<i>Deep neural network</i>
Rede neural recursiva	<i>Recursive neural network</i>
Redes adversárias com consistência de ciclo	<i>Cycle-Consistent Adversarial Networks – CycleGAN</i>
Redes neurais multicamadas	<i>Multi-layer neural networks</i>
Registrador	<i>Logger</i>
Rolos torpedos ou rolos tipo dedo	<i>Finger rolls</i>
Semicondutor de óxido metálico complementar	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
Sensor de detecção e alcance de luz	<i>Light Detection and Ranging – LiDAR</i>
Sistemas ciberfísicos	<i>Cyber Physical Systems – CPS</i>
Solicitação-preenchimento	<i>Prompt-completion</i>
Solicitações por difusão	<i>Broadcast calls</i>
Tamanho do lote	<i>Batch size</i>
Taxa de aprendizagem	<i>Learning rate</i>
Terminar	<i>Terminate</i>
Transformador apenas com codificador	<i>Encoder-only transformer</i>
Transformador apenas com decodificador	<i>Decoder-only transformer</i>
Transformador completo	<i>Full transformer</i>
Transformadores pré-treinados generativos GPT	<i>Generative Pre-trained Transformers</i>

<b>Português</b>	<b>Inglês</b>
Transporte de Filas de Mensagens de Telemetria	<i>Message Queuing Telemetry Transport – MQTT</i>
Unidade de texto	<i>Token</i>

## APÊNDICE B – Correções nos textos agregados

Este apêndice apresenta as correções e atualizações nas informações publicadas nos artigos agregados nessa Tese de Doutorado, incluindo o detalhamento das modificações e respectivas justificativas.

Equação (5) original [5]:

$$A = A_0 \operatorname{erf}\left(\frac{p}{2G^{1/2}}\right) = \int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma(x,y)}{2G^{1/2}}\right) dx dy$$

Equação (5) corrigida:

$$A = A_0 \operatorname{erf}\left(\frac{p}{2G^{1/2}}\right) = 2 \int_0^{c(z_0)} \int_{-b(y,z_0)}^{a(y,z_0)} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{R_2}\right)^2} \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma(x,y)}{2G^{1/2}}\right) dx dy$$

Detalhamento: Essa equação representa a área de contato real na superfície viscoelástica da correia tubular, quando em contato com o rolo de um painel fechado. Adotou-se a profundidade de deformação da superfície de contato em formato parabolóide elíptico (Equação (1)), portanto a área da superfície corresponde a  $\text{Área} = \iint \sqrt{1 + (dz/dy)^2 + (dz/dx)^2} dx dy$ . Como  $c$  representa a meia largura da superfície de contato no eixo  $y$ , faz-se necessário multiplicar a área de integração por 2, conforme apresentado na versão corrigida da Equação (5). Com esses ajustes, atualizaram-se as Equações (5) e (7).

Figura 18 original [5]:

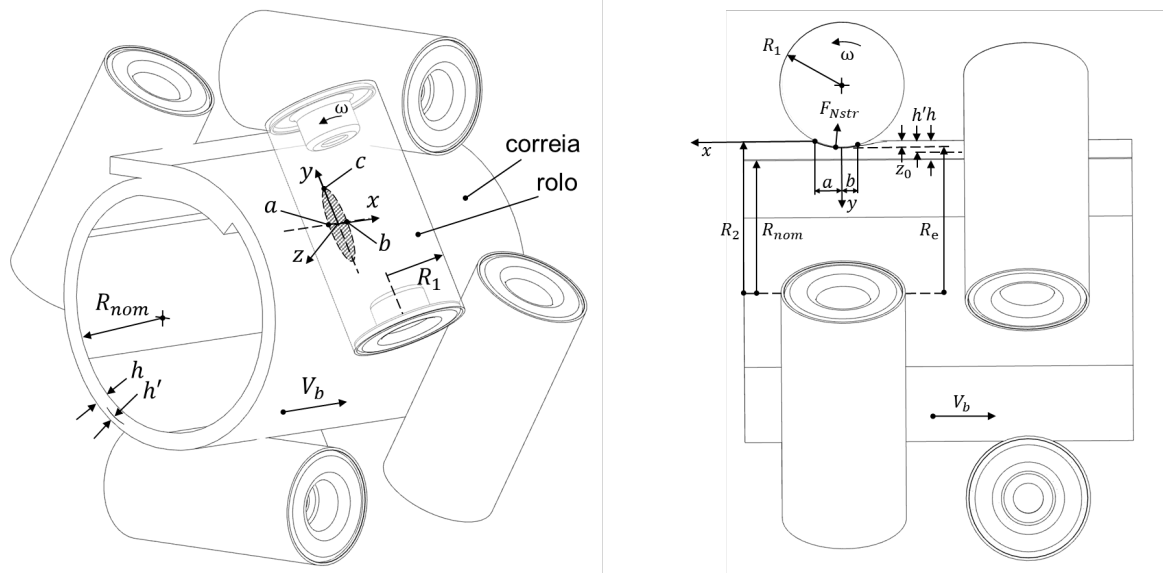
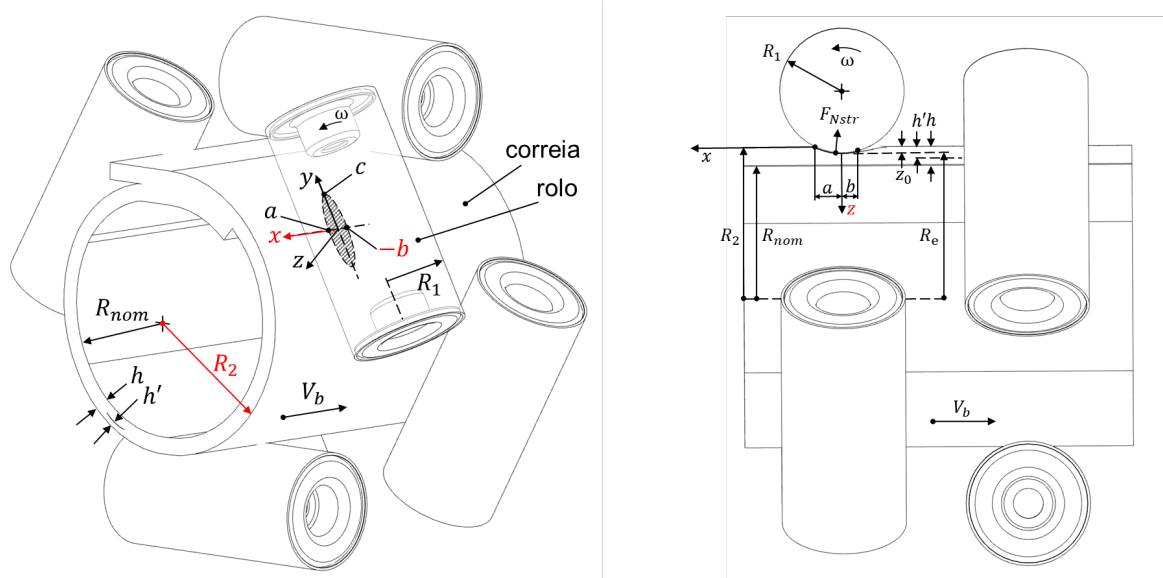



Figura 18 corrigida:




Detalhamento: Adicionou-se a indicação do raio externo da correia tubular  $R_2$ , ajustaram-se a direção do eixo  $x$  no plano cartesiano e o sinal do ponto de contato final  $-b$  entre o rolo e a correia tubular, para uma representação adequada do intervalo de integração. Também se corrigiu o erro tipográfico no eixo  $z$  da vista lateral.

## APÊNDICE C – Checklist para inspeção de segmentos curvos

Este apêndice apresenta o checklist para inspeção de segmentos curvos conforme proposto nessa Tese de Doutorado, incluindo o registro fotográfico da atividade.



### Pipe Conveyor Belt Overlap Stability Assessment Field Inspection Checklist



Inspected by:

- Paulo Roberto (field assessment)
- Leonardo dos Santos (remote live streaming)

Date and time (dd-mmm-yyyy, 00:00 – 00:00):

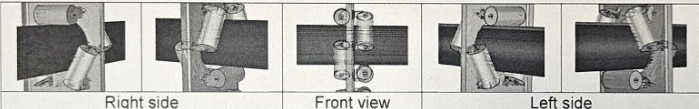
- 05 / MAY / 2022, 15 : 30 – 16 : 30

Authors:

- Leonardo dos Santos e Santos
- Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho
- Emanuel Negrão Macêdo





Field data – Pipe Conveyor 02





Curved flight	Overlap position (°)	Clearance to the belt back cover (mm)					
		Idler 1	Idler 2	Idler 3	Idler 4	Idler 5	Idler 6
10	10	0	0	0	30	42	0
13	10	0	0	0	40	35	0
15-16	0	0	0	5	30	24	0
17	0	0	0	23	25	25	0



Right side      Front view      Left side

Fig. Example of good images per curved flight

Flight 10	Flight 13	Flight 15-16	Flight 17
			

Segmento 10	Segmento 13	Segmento 15-16	Segmento 17
			

Apêndice C – Folha 1 de 1