UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RICARDO LUIS BALIEIRO

**Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão
computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento
e controle de falhas em correias transportadoras**

São Carlos
2019

RICARDO LUIS BALIEIRO

**Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão
computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento e controle
de falhas em correias transportadoras**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em Ciências,
Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas
Dinâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Rogério A. Flauzino.

**Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível
na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.**

São Carlos

2019

Autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo (a) autor (a).

B186d BALIEIRO, RICARDO LUIS
Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento e controle de falhas em correias transportadoras / RICARDO LUIS BALIEIRO; orientador Prof. Dr. ROGÉRIO ANDRADE FLAUZINO. São Carlos, 2019.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Correias Transportadoras. 2. Aprendizado de Máquina. 3. Visão Computacional. 4. Reconhecimento de padrões. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RICARDO LUÍS BALIEIRO**.

Título da tese: "Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento e controle de falhas em correias transportadoras".

Data da defesa: 09/08/2019

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Dennis Brandão**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Fabício Guimarães Baptista**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru)

Prof. Dr. **Silvio Giuseppe Di Santo**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Fábio Bertequini Leão**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Ilha Solteira)

Resultado:

Aprovado

aprovado

Aprovado

SDiS

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda essa longa caminhada. A Jesus Cristo, por ser essencial em minha vida, estar presente e ser socorro nas horas de angústia. Ao Espírito Santo, fonte de toda a ciência, por derramar sua luz sobre nossa inteligência. A Maria, Nossa Senhora, mãe de misericórdia, vida doce e esperança nossa, por ter colocado sua mão antes da minha nesse projeto. A São José, meu amado São José, por toda a intercessão junto a Deus e seu filho Jesus Cristo e pelas graças recebidas e que, por bondade divina, passaram e passam por vossas sagradas mãos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus Pai, a Jesus Cristo e ao Espírito Santo por todo amor, carinho, paciência e condução ao longo de minha vida. A Nossa Senhora, Maria, e São José, pelas intercessões constantes e graças derramadas sobre nossa família. Muito, muito obrigado!

A minha amada família, minha esposa, Susana, e meus filhos, Gabriela e Felipe, pela capacidade de acreditarem em mim e, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até essa etapa de minha vida. Obrigado, amo muito todos vocês.

Agradeço ao professor Dr. Rogério Andrade Flauzino, pela oportunidade, confiança, paciência e orientações dedicadas ao longo desse trabalho de doutorado.

Faço questão de agradecer ao meu amigo Dr. Diego Rafael Moraes, que enriqueceu muito minha experiência de doutorado com sua amizade, seu apoio, conselhos e conhecimentos técnicos.

Minha experiência de doutorado não teria sido inicialmente viabilizada sem o apoio de meu amigo e diretor da Nova Smar SA, Sr. Libânio Carlos de Souza.

Muito obrigado!

BALIEIRO, R. L. **Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento e controle de falhas em correias transportadoras.** 2019. 175p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

RESUMO

Correias transportadoras têm sido utilizadas como um modo eficiente de transporte de materiais por diversos ramos da indústria. A vida útil desse equipamento é influenciada pelo desgaste natural ocasionado pelo uso excessivo e falhas, tais como rasgos, cortes e perfurações. Nesse trabalho, é proposto um método de identificação de falhas em correia transportadora por meio de processamento digital de imagens, combinadas com técnicas de escaneamento 3D a laser e aprendizado de máquinas (redes neurais e SVM (Support Vector Machine - Máquina de Vetores de Suporte)). A averiguação experimental foi efetuada em duas etapas: a primeira etapa inicia-se com a aquisição, o pré-processamento e a geração do banco de imagens; a segunda, com a extração e a classificação das amostras. O vetor de características foi submetido a dois classificadores: rede neural do tipo Perceptron Múltiplas Camadas (com 15 topologias candidatas) e um classificador SVM, variando sua função kernel: linear, quadrática, polinomial, gaussiano, RBF (Radial-Basis Function - Função de Base Radial) e MLP (Multilayer Perceptron – Perceptron Múltiplas Camadas). Os resultados experimentais mostram que a metodologia proposta obtém uma boa acurácia na estimação das falhas, mostrando-se promissora na tarefa de diagnosticar e classificar falhas em correias transportadoras.

Palavras-chave: Correias Transportadoras; Aprendizado de Máquinas; Visão Computacional; Reconhecimento de Padrões.

BALIEIRO, R. L. **Desenvolvimento de abordagem baseada em técnicas de visão computacional e de aprendizado de máquinas para monitoramento e controle de falhas em correias transportadoras.** 2019. 175p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

ABSTRACT

Conveyor belts have been used as an efficient way of transporting materials by various industry branches. This equipment's lifespan is influenced by natural wear caused by overuse and flaws, such as tears, cuts, and perforations. This work proposes a method of identifying flaws in the conveyor belt using digital image processing, combined with 3D laser scanning techniques and machine learning (neural networks and SVM - *Support Vector Machine*). The experimental investigation has been carried out in two stages: the first stage begins with the acquisition, preprocessing, and generation of an image bank; the second, with the extraction and classification of the samples. The characteristic's vector has been submitted to two classifiers: Multi-Layer Perceptron neural network (with 15 candidate topologies) and an SVM classifier, varying its kernel function: linear, quadratic, polynomial, Gaussian, RBF (Radial-Basis Function) and MLP (Multilayer Perceptron). The experimental results show that the proposed methodology obtains a good accuracy in the failure estimation, being promising in the task of diagnosing and classifying flaws in conveyor belts.

Keywords: Conveyor Belts, Machine Learning, Computer Vision, Pattern Recognition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração típica de transportadores de correia de minério de ferro	36
Figura 2 - Estrutura de uma correia transportadora de cabo de aço	37
Figura 3 - Correia transportadora fixa	38
Figura 4 - Correias transportadoras fixas sobre água	39
Figura 5 - Correia transportadora móvel	39
Figura 6 - Correia transportadora portátil	40
Figura 7 - Poço de mineração a céu aberto	41
Figura 8 - Produção de minério de ferro no Complexo Minerador de Carajás (em milhões de toneladas)	43
Figura 9 – Complexo Minerador de Carajás.....	44
Figura 10 – Correia Transportadora Sahara Ocidental	45
Figura 11 - Correia transportadora Índia - Bangladesh	46
Figura 12 - Correia transportadora - Sistema aéreo - Cimenteira Holcim Brasil.....	47
Figura 13 - Ponto de transferência com mudança de direção	47
Figura 14 – Trajeto parcial entre pedreira e fábrica de cimento Vicat	48
Figura 15 - Equilíbrio de forças	49
Figura 16 – Configuração tubular	50
Figura 17 - a) Planta do túnel de Barcelona; b) Planta do túnel The Baumgartner ...	51
Figura 18 - Ponto de transferência típico	53
Figura 19 - Danos de impacto	54
Figura 20 - Cálculos para determinação da carga de impacto de material em um ponto de transferência do transportador [Norma CEMA 575-2000]	55
Figura 21 - Sistemas amortecedores de impacto	56
Figura 22 - Atrito relativo à aceleração.....	57
Figura 23 - Derramamento de material	58
Figura 24 - Rolete quebrado.....	59
Figura 25 - Polia magnética.....	60
Figura 26 – Detritos alojados entre a esteira e o sistema de vedação:	61
Figura 27 - <i>Carryback</i>	62
Figura 28 - Sistemas de limpeza	63
Figura 29 - Carregamento descentralizado	64
Figura 30 - Correia desalinhada tocando a estrutura transportadora	64

Figura 31 - Roletes auto alinhadores.	65
Figura 32 - Danos à correia.....	67
Figura 33 - Tempo de parada referente aos componentes da correia transportadora	68
Figura 34 - Sistema mecânico de detecção do rasgo da correia.....	69
Figura 35 - Sistema mecânicos detecção do rasgo da correia.....	70
Figura 36 - Chave de detecção de rasgo em correia transportadora de cavalete de vidro	71
Figura 37 – Sistema de bandeja de tela.....	72
Figura 38 - Bandeja acionada por sensor de vibração	72
Figura 39 - Detector de rasgo por indução	74
Figura 40 - Sistema de detecção de rasgo RFID	74
Figura 41 - Detector ultrassônico.	75
Figura 42 - monitoramento da largura da correia por ultrassom.....	76
Figura 43 – Posicionamento dos sensores de alcance	77
Figura 44 - Diagrama do sistema	77
Figura 45 - Sistema de detecção de rasgo por pressão.....	78
Figura 46 - Instalação dos sensores de pressão.....	78
Figura 47 – Curva de pressão da correia transportadora.....	79
Figura 48 - Etapas do método RB.....	80
Figura 49 - Amostras defeituosas.....	81
Figura 50 - Amostras defeituosas com a região defeituosa ampliada.	81
Figura 51 - Detector de rasgo tipo fotoelétrico	83
Figura 52 - Chave detectora de rasgo em correia	84
Figura 53 - Sistema de monitoramento por meio de câmeras.....	85
Figura 54 - Sistema de inspeção visual da correia transportadora.....	87
Figura 55 - Sistema de aquisição	87
Figura 56 - Pré-processamento da imagem do rasgo	88
Figura 57 - A função do rasgo	89
Figura 58 - O sistema de aquisição da imagem da correia transportadora com base na visão computacional.....	90
Figura 59 - Imagens de correia transportadora com falha de rasgo longitudinal:.....	90
Figura 60 - Imagens de correia transportadora processada por SSR com parâmetro de escala de 50	91

Figura 61 - Imagens de correia transportadora processadas por MSR com parâmetros de escala de 10, 50 e 100	91
Figura 62 - Método SSR com detecção de bordas.....	92
Figura 63 - Segmentação das imagens.....	92
Figura 64 - Rasgo longitudinal em uma imagem binária	92
Figura 65 - Resultados da detecção de imagens da correia transportadora	93
Figura 66 - Sistema de detecção CCD.....	94
Figura 67 – Característica da linha na detecção do rasgo longitudinal	95
Figura 68 – Imagens processadas por transformada de Hough	96
Figura 69 - Imagens processadas por histograma	96
Figura 70 - Sistema de detecção de rasgo.....	97
Figura 71 - Amostra de rasgo longitudinal.....	98
Figura 72 - Pré-processamento da imagem	99
Figura 73 - Imagens da correia transportadora	99
Figura 74 - Janelas lineares	100
Figura 75 - Extração de padrão de disco e correção de pose	100
Figura 76 - Sistema a <i>laser</i> de detecção de rasgo	101
Figura 77 - Diagrama de blocos da proposta do presente trabalho.....	104
Figura 78 - Diagrama da estrutura	105
Figura 79 - Estrutura montada.....	106
Figura 80 - Montagem final.....	106
Figura 81 - Suporte para simulação de falhas.....	107
Figura 82 - Deformação do modelo.....	108
Figura 83 - Suporte de modelos	108
Figura 84 - Plataforma <i>laser</i>	109
Figura 85 – Configuração do laser.	110
Figura 86 - Caixa de proteção IP67.....	112
Figura 87 - Simulação de rasgos internos.....	113
Figura 88 – Modelos.....	114
Figura 89 – Modelos de falhas	116
Figura 90 – Cameraman.	117
Figura 91 - Imagem adquirida da correia	117
Figura 92 - Efeito da exposição.....	118
Figura 93 - Refletor Led 10W	119

Figura 94 - Princípio do método “luz estruturada”	120
Figura 95 - Protótipo para a aquisição de imagens	121
Figura 96 - Equação das lentes.....	121
Figura 97 - Cartão da calibragem.....	122
Figura 98 - Cartão da calibragem com distância de 200 mm	123
Figura 99 - Posicionamento da <i>webcam</i> e relação à linha do <i>laser</i> :	125
Figura 100 - Tela de visualização de posicionamento da correia transportadora....	126
Figura 101 - Posicionamento final da <i>webcam</i> C920	127
Figura 102 - Tela de visualização de posicionamento da correia transportadora....	128
Figura 103 - Interface homem-máquina do protótipo	129
Figura 104 - Interface homem-máquina do protótipo da fase de aprimoramento....	130
Figura 105 – Imagem adquirida.....	131
Figura 106 – Janela deslizante – diagrama.....	132
Figura 107 - Exemplo da ROI com a projeção do <i>laser</i>	133
Figura 108 - Imagem adquirida	134
Figura 109 - Imagem binarizada.....	135
Figura 110 - Imagem com detecção de bordas	135
Figura 111 - Imagem com detecção de bordas	136
Figura 112 – Banco de Imagens – Imagens adquiridas:	137
Figura 113 - Recorte de imagens - Tela Adobe Fireworks	138
Figura 114 - Imagens recortadas - Conjunto sem rasgo	138
Figura 115 - Imagens recortadas - Conjunto com rasgo	138
Figura 116 - Ampliação da linha do laser	140
Figura 117 - Banco de Imagens.	140
Figura 118 - Falha do tipo rasgo	141
Figura 119 - Imagem integral	144
Figura 120 - Regiões retangulares da janela deslizante	144
Figura 121 - Composição do vetor descritor.....	145
Figura 122 - Emendas de correia transportadora.....	147
Figura 123 - Arquitetura PMC e topologias	148
Figura 124 - Método de validação cruzada usando k-partições	150
Figura 125 - Algoritmo de treinamento RNA.....	153
Figura 126 – Frequência de repetições de topologias candidatas	157
Figura 127 - Sensibilidade média do treinamento 21	157

Figura 128 - Sensibilidades do ensaio *kernel*/linear161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Abrasividade de vários tipos de materiais.	56
Tabela 2 - Velocidades máximas recomendadas em m/s – materiais a granel.....	58
Tabela 3 - Detecção de defeitos de imagem da correia transportadora	82
Tabela 4 - Resultados de detecção de rasgo longitudinal	93
Tabela 5 – C270: Valores da relação entre os parâmetros da lente da <i>webcam</i>	123
Tabela 6 - C920: Valores da relação entre os parâmetros da lente da <i>webcam</i>	124
Tabela 7 - Valores dos elementos para cálculo da distância entre a câmera e o <i>laser</i>	125
Tabela 8 - Coleta de imagens	139
Tabela 9 - Quantidade de amostras por tipo de falha.	142
Tabela 10 - Tamanho dos vetores descritores.	146
Tabela 11 - Mapeamento para a classificação <i>one of c-classes</i>	149
Tabela 12 - Mapeamento para a classificação SVM.	150
Tabela 13 - Distribuição de amostras.....	151
Tabela 14 - Distribuição de amostras.....	151
Tabela 15 - Resultados dos treinamentos	155
Tabela 16 - Treinamento 21	158
Tabela 17 - Tabela de contingência resultante.....	158
Tabela 18 - Resultados dos treinamentos	159
Tabela 19 - Tabela de contingência resultante - Conjunto Completo.....	160
Tabela 20 - Média de sensibilidade por configuração	161
Tabela 21 - Sensibilidades do ensaio <i>kernel</i> linear	162
Tabela 22 - Tabela de contingência resultante.....	162
Tabela 23 - Resultados dos treinamentos	163
Tabela 24 - Tabela de contingência resultante - Conjunto Completo.....	164
Tabela 25 - Desempenho dos classificadores.....	164
Tabela 26 - Desempenho dos classificadores.....	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AHE	<i>Adaptive Histogram Equalisation</i> (Equalização Adaptativa de Histograma).
BC	<i>Belt conveyor</i> (transportador de correia).
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (Dispositivo de Carga Acoplada).
CEMA	<i>Conveyor Equipment Manufacture Association</i> .
DRB	<i>Dark Regular Band</i> (Banda Regular Escura).
EVA	<i>Ethil Vinil Acetat</i> (Etileno Acetato de Vinila).
FPS	<i>Frames Per Second</i> (Quadros Por Segundo).
HSV	<i>Hue Saturation Value</i> (Matiz Saturação Valor).
IP	<i>International Protection</i> (Proteção Internacional).
LRB	<i>Light Regular Band</i> (Banda Regular de Luz).
MPL	<i>Multilayer Perceptron</i> (Perceptron Multicamada).
MSR	<i>Multi-Scale Retinex</i> (Retinex multi-escala).
NBR	Norma Brasileira.
NF	Normalmente Fechado.
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análise de Componentes Principais).
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> (Controlador Lógico Programável).
PMC	<i>Perceptron Multicamada</i> .
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i> (Policloreto de Vinil).
RB	<i>Regular Bands</i> (Bandas Regulares).
RBF	<i>Radial-Basis Function</i> (Função de Base Radial).
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> (Identificação por Radiofrequência).
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> (Vermelho, Verde, Azul).
RNA	Redes Neurais Artificiais.
ROI	<i>Region Of Interest</i> (Região de Interesse).
SSR	<i>Single Scale Retinex</i> (Retinex de Única Escala).
SVM	<i>Support Vector Machine</i> (Máquina de Vetores de Suporte).
TC	Transportador de correia.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 Objetivo geral	31
1.2 Objetivos específicos da tese	32
1.3 Objetivos específicos de trabalhos futuros	32
1.4 Justificativas	33
1.5 Contribuições da tese	33
1.6 Organização do trabalho	33
2 TRANSPORTADOR DE CORREIA	35
2.1 Introdução	35
2.2 Principais partes e componentes do transportador de correia	36
2.3 Classificação	38
2.3.1 Fixa	38
2.3.2 Móvel	39
2.3.3 Portátil	40
2.4 Vantagens	40
2.4.1 Eficiência energética	41
2.4.1.2 Caminhões versus transportadores de correia	41
2.4.2 Ferro Carajás S11D	43
2.5 Otimização de rotas	44
2.5.1 Transportador de correia – Saara	44
2.5.2 Correia transportadora – Elevada	45
2.5.3 Curvas	47
2.5.4 Transportador de correia tubular	49
2.6 Conclusão	51
3 FATORES QUE PROPICIAM DANOS À CORREIA TRANSPORTADORA	53
3.1 Ponto de transferência	53
3.1.1 Força de impacto e atrito de materiais	54
3.1.2 Atrito de materiais	56
3.1.2 Detritos alojados entre a correia e demais componentes	58
3.1.2.1 Derramamento de material	58
3.1.2.2 Fragmentos metálicos no fluxo de materiais	59

3.1.2.3 Obstrução do sistema de vedação.....	60
3.1.2.4 Carryback.....	61
3.1.3 Desalinhamento da correia	63
3.2 Conclusão.....	66
4 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE FALHAS EM CORREIAS TRANSPORTADORAS	67
4.1 Sistemas mecânicos	69
4.1.1 Chaves elétricas	69
4.1.2 Cavalete de vidro	70
4.1.3 Bandeja.....	71
4.2 Sistemas eletrônicos	73
4.2.1 Componentes incorporados na correia	73
4.2.2 Detector ultrassônico	75
4.2.3 Sistemas de raio-X.....	79
4.2.4 Sensores fotoelétricos	83
4.3 Sistema de monitoramento por meio de câmeras	84
4.3.1 Sistema de monitoramento por meio de câmeras.....	85
4.3.2 Sistema de visão computacional.....	86
4.3.3 Detecção on-line de falha com algoritmo SSR.....	89
4.3.4 Sistema de detecção de rasgo com CCD de luz visível e infravermelho ..	94
4.3.5 Visão de máquina na detecção on-line de rasgo longitudinal	96
4.4 Conclusão.....	102
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	103
5.1 Estrutura física	105
5.1.1 Correia transportadora.....	107
5.1.2 Suporte para os modelos de falhas	107
5.1.2.1 Fase de validação	107
5.1.2.2 Fase de aprimoramento	107
5.1.3 Laser.....	109
5.1.3.1 Fase de Validação	109
5.1.3.2 Fase de Aprimoramento.....	110
5.1.4 Webcam.....	111
5.1.4.1 Fase de Validação	111

5.1.4.2 Fase de Aprimoramento.....	111
5.1.5 Caixas de Proteção.....	112
5.1.6 Computador	112
5.1.7 Simulação de rasgos	113
5.1.7.1 Fase de Validação	113
5.1.7.2 Fase de Aprimoramento.....	114
5.2 Aquisição de imagem	116
5.2.1 Imagem em movimento.....	117
5.2.2 Exposição	118
5.2.2.1 Fase de Aprimoramento.....	118
5.2.3 Princípio de escaneamento 3D a laser	120
5.2.4 Procedimentos para posicionamento da webcam.....	121
5.2.4.1 Fase de Validação	126
5.2.4.2 Fase de Aprimoramento.....	126
5.2.5 Configuração de aquisição de imagem.....	128
5.2.5.1 Fase de Validação	128
5.2.5.2 Fase de Aprimoramento.....	129
5.3 Pré-processamento.....	131
5.3.1 Região de interesse	131
5.3.1.1 Fase de Validação	131
5.3.1.2 Fase de Aprimoramento.....	133
5.3.2 Conversão RGB para HSV	134
5.4 Segmentação.....	135
5.5 Banco de imagens	136
5.5.1 Fase de Validação	136
5.5.2 Fase de Aprimoramento.....	139
5.5.3 Redimensionamento das imagens (Janela Deslizante)	142
5.6 Extrações de características.....	142
5.6.1 Redução de escala	142
5.6.2 Imagem integral	143
5.6.2.1 Fase de Validação	145
5.6.2.2 Fase de Aprimoramento.....	145
5.6.3 Processamento em paralelo	146
5.7 Classificação	146

5.7.1 Classificação (RNA).....	148
5.7.1.1 Fase de Validação	148
5.7.1.2 Fase de Aprimoramento.....	149
5.7.1.3 Fase de Validação e Aprimoramento	149
5.7.2 Classificação (SVM).....	149
5.7.3 Treinamento.....	150
5.7.3.1 Fase de Validação	151
5.7.3.2 Fase de Aprimoramento.....	151
5.8 Conclusão	152
6 TREINAMENTO DOS CLASSIFICADORES E RESULTADOS	153
6.1 Treinamento RNA	153
6.1.1 Fase de Validação	153
6.1.2 Fase de Aprimoramento.....	159
6.2 Treinamento SVM	160
6.2.1 Fase de Validação	160
6.2.2 Fase de aprimoramento	163
6.2.3 Comparação entre a fase de validação e a fase de aprimoramento.....	164
6.2.4 Desempenho do processador	165
6.3 Conclusão.....	165
7 CONCLUSÃO.....	166
7.1 Continuidade da pesquisa.....	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Correias transportadoras têm sido utilizadas como meio de transporte de materiais em diversos ramos da indústria, tais como recursos naturais, fabricação de açúcar, produção de papel e celulose, cimento e cal, agricultura, aeroportos, portos, entre outros.

Destaca-se a sua adoção principalmente pelas empresas no transporte eficiente de materiais a granel, de diferentes propriedades físico-mecânicas, através de longas distâncias, alta velocidade, baixo grau de degradação, de forma confiável e com altos índices de produtividade (MAZURKIEWICZ, 2007). Além da alta eficiência em comparação a outros métodos de transporte (ZHANG; XIA, 2010), destaca-se o fato de serem de construção simples, podendo ser instaladas em condições ambientais variadas, bem como uma menor exigência em relação a operação, manutenção e supervisão (MAZURKIEWICZ, 2008).

Essas características fazem com que as correias transportadoras tenham um papel fundamental nos atuais sistemas de transporte contínuo de grande escala, como no caso do minério de ferro e carvão (QIAO; TANG; MA, 2013; QIAO; ZHANG, 2010).

Afirmações como as de Qiao et al. (2013) e Qiao e Zhang (2010) podem ser comprovadas em projetos de mineração, como o projeto Ferro Carajás S11D, em Cannã dos Carajá (PA), desenvolvido pela Vale. O projeto, com estimativa de injetar na economia US\$ 19,67 bilhões em investimento, tem como objetivo transportar uma produção de 90 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. O projeto se estenderá por 37 km de extensão em meio à Floresta Amazônica (VALE, 2013). De acordo com os estudos efetuados pela Vale (2013), caso o projeto seguisse a linha de uma mineração convencional, seriam necessários 100 caminhões circulando. O estudo acrescenta que a adoção de correia transportadora permitirá reduzir em 50% as emissões de gases de efeito estufa ou 130 mil toneladas de CO₂ equivalentes por ano.

Correias transportadoras têm a vida útil influenciada pelo desgaste natural de uso e outros fatores, por exemplo, danos à superfície da correia causados pela velocidade e pela força de impacto de materiais no ponto de alimentação (TAYADE et

al., 2015; SWINDERMAN et al., 2009), fragmentos metálicos, que involuntariamente se tornam parte do fluxo de materiais (ASSOCIATION FOR RUBBER PRODUCTS MANUFACTURERS, 2011), detritos alojados entre a polia e a correia (VELMURUGAN et al., 2014), entre outros.

Dessa forma, podem ocorrer falhas de operação, como rasgos, cortes e perfurações, que, se não diagnosticadas em um curto espaço de tempo, tendem a causar sérios danos, como o prolongamento do rasgo ao longo da correia (DESHMUKH; JADHAO; VITHALKAR, 2014; CHUNXIA; SI, 2011).

Analisando sua eficiência, quando ponderada pela vida útil, outro fator importante a ser considerado é o custo da correia, que gira em torno de 25% a 50% do custo total desse meio de transporte (GUPTA, 2014; GURJAR; YADAV; JAYASWAL, 2012). Assim, diversos esforços têm sido empregados em sistemas de monitoramento de correia transportadora.

O monitoramento visa a diagnosticar falhas de operação que possam gerar um longo período de tempo de inatividade do sistema de transporte, ameaçar a segurança ou ainda gerar perdas financeiras significativas (ARRUDA, 2015; ARAÚJO, 2010; COELHO, 2010).

Atualmente, diversas pesquisas têm desenvolvido uma variedade de métodos para o monitoramento de correia transportadora, tais como sistemas baseados em processamento de imagem (YANG et al., 2014; QIAO; TANG; MA, 2013; QIAO; ZHANG, 2010; PENG, 2013), sistemas de monitoramento da pressão da correia (CHUNXIA; SI, 2011), análise de sinais de sensores por meio de sistemas Neuro-Fuzzy (YUAN et al., 2014), análise de imagens de Raio-X com ou sem o auxílio de redes neurais (LI; MIAO; ZHANG, 2011; WEN et al., 2011), sensores inteligentes incorporados em correias transportadoras (XING; WAUH, 2011), sensores de rádio-frequência (NICOLAY; TREIB; BLUM, 2004), sensor fotoelétrico de infravermelho (TIE-ZHU; FU-QIANG; XIAO-YU, 2011), sistemas de ultrassom (BELTSCAN SYSTEMS PTY LTD., 2017; ASSOCIATION FOR RUBBER PRODUCTS MANUFACTURERS, 2011), sistemas mecânicos (LIMA, 2016; CASAGRANDE, 2010), entre outros.

Levando em consideração as pesquisas citadas, o presente trabalho concentra-se na visão computacional, escaneamento 3D e classificação de imagens, permitindo, assim, uma nova contribuição para a área de detecção de falhas em esteira.

A visão computacional tem sido usada em diversas áreas para a implementação de sistemas de monitoramento em tempo real. Nesse sentido, Shapiro e Stockman (2001) afirmam que o objetivo da visão computacional é a aquisição de imagens por sensores e, baseado no processamento dessas imagens, tomar decisões úteis sobre objetos. Com processamento de imagens, que compreende pré-processamento, segmentação e pós-processamento, é possível descrever propriedades de objetos, tais como forma, cor, distribuição e iluminação, etc. (SZELISKI, 2001).

No presente trabalho, a junção de duas técnicas, visão computacional e escaneamento 3D a *laser*, permitiu um aprimoramento considerável na descrição de objetos da detecção em falhas em esteira transportadoras, num primeiro momento para rasgos, e, futuramente, a técnica será estendida para cortes longitudinais e perfurações.

Segundo Kau et al. (2007), o escaneamento a *laser* é uma técnica válida e confiável, que tem sido empregada na indústria automotiva e aeroespacial para a detecção de defeitos microscópicos. Sistemas a *laser* para escaneamento tridimensional têm sido usados em diversas áreas da engenharia para prototipagem, impressão 3D, ciências médicas, mapeamento de terras, etc. (BOSEMANN, 2005).

A fim de obter descritores com fortes características e, assim, facilitar a classificação de falhas, foram adotadas diversas técnicas simples e complexas, tais como diferentes espaços de cores, segmentação, detecção de bordas, processamento em paralelo, etc.

Para a identificação das falhas das correias transportadoras, através do descritor de características, adotou-se o aprendizado de máquinas (RNA - Redes Neurais Artificiais e SVM – *Support Vector Machine* – Máquina de Vetores de Suporte).

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de monitoramento em tempo real da correia transportadora para a identificação de falhas em correia transportadora, inicialmente os rasgos, posteriormente, cortes e perfurações, combinando, para isso, diversas técnicas, como escaneamento 3D a *laser*, visão computacional, processamento paralelo e aprendizado de máquinas (RNA e SVM).

Para alcançar tal objetivo, é proposta a divisão do processo em duas etapas. Primeira: aquisição, tratamento e criação de um banco de imagens. Segunda: classificar as imagens em duas classes, falha e não falha.

1.2 Objetivos específicos da tese

Para investigar a robustez da metodologia proposta, serão adotados como objetivos específicos:

- a) Avaliar o comportamento das imagens, adquiridas *on-line* por uma *webcam*, com e sem a aplicação de *laser*, para a identificação de rasgos em correia transportadora;
- b) Analisar espaços de cores diferentes para tomada de decisão de qual espaço atende melhor às necessidades da presente aplicação;
- c) Averiguar o vetor de características criado com informações discriminantes para a identificação de falhas em correia transportadora;
- d) Aferir os resultados da classificação obtida pelo aprendizado de máquinas (RNA e SVM).

1.3 Objetivos específicos de trabalhos futuros

Os itens listados abaixo têm como objetivo servir para análise e implementação de trabalhos futuros.

- a) Propor a criação de graus de severidade da falha da correia transportadora, gerando, assim, diferentes níveis de alarme;
- b) Analisar a possibilidade de detecção, posteriormente, para rasgo de bordas e emendas da correia transportadora;
- c) Propor a criação e disponibilização de um banco de dados de imagens com diversos tipos de falhas, tais como rasgos internos, rasgos de bordas, cortes, perfurações, emendas, para estudos futuros;
- d) Analisar a viabilidade, posteriormente, do armazenamento das falhas ocorridas em um banco de dados, a fim de que seja utilizado para diagnósticos preditivos de falhas. Para tanto, seriam armazenados dados de operação da correia transportadora, tais como data e hora de alarme de falha, severidade da falha, horário

de parada e reinício da correia transportadora mediante a detecção de falhas, tempo de operação do sistema.

1.4 Justificativas

Considerando os fatores anteriormente descritos, conclui-se a importância de se estudarem métodos cada vez mais eficazes para a identificação de falhas em correias transportadoras, em especial a identificação de rasgos que possam deixar inoperante toda uma linha de produção.

1.5 Contribuições da tese

São contribuições dessa tese de doutorado:

- a) Proposta de uma nova metodologia na detecção de falhas baseada em visão computacional e escaneamento 3D;
- b) Criação de um banco de imagens com diversos tipos de simulação de falhas em correia transportadora: perfurações, rasgos e cortes.

1.6 Organização do trabalho

Inicialmente, o presente trabalho aborda a descrição do problema com relação a falhas e detecção de rasgos em correias transportadoras. Depois, são apresentados trabalhos acadêmicos e industriais como forma de solução para o problema apresentado. A seguir, são descritas as aplicações dessas técnicas na solução dos problemas, o desenvolvimento do protótipo, os resultados obtidos e, finalizando, as conclusões.

O conteúdo de cada capítulo do trabalho é:

- a) CAPÍTULO 1 – Introdução, descrição do problema, justificativas, objetivos gerais e específicos da metodologia proposta;
- b) CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfica sobre transportador de correias, descrevendo sua evolução, principais características, vantagens, eficiência energética, etc.;

c) CAPÍTULO 3 – Abordam-se os principais fatores inerentes ao processo industrial que podem ocasionar danos à correia transportadora e ações adotadas para evitá-las ou minimizá-las;

d) CAPÍTULO 4 – Destacam-se diversos sistemas de monitoramento e controle de falhas em correia transportadora;

e) CAPÍTULO 5 - Apresenta os principais conceitos e passos adotados no desenvolvimento da metodologia do presente trabalho;

f) CAPÍTULO 6 - Descreve a abordagem adotada no treinamento e os resultados obtidos em ensaios realizados com os classificadores RNA e SVM;

g) CAPÍTULO 7 - Conclusões e trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 TRANSPORTADOR DE CORREIA

2.1 Introdução

Segundo Kumar et al. (2015), os primeiros transportadores de correia foram desenvolvidos no ano de 1795, feitos de couro, correndo sobre camas de madeira, movimentadas com manivelas e uma série de polias. Passaram a ser utilizados no transporte de carvão, minérios e outros produtos a partir 1892, impulsionados por diversas invenções de Thomas Robins nesse período. Em 1901, foram desenvolvidos os primeiros transportadores de correia de aço por Sandvik. No ano de 1905, houve uma grande revolução na indústria de mineração, com a invenção dos transportadores de correia para o uso em minas de carvão, feitos por Richard Sutcliffe. Henry Ford, em 1913, adotou os transportadores de correia em sua linha de montagem na fábrica Ford Motor Companies's Highland Park, em Michigan (KUMAR; BASHA; SREENIVASULU, 2015).

Atualmente, têm sido utilizados como um meio de transporte de materiais em diversos ramos da indústria, tais como recursos naturais, fabricação de açúcar, produção de papel e celulose, cimento e cal, agricultura, aeroportos, portos, entre outros (MAZURKIEWICZ, 2009).

A adoção de transportadores de correia está no fato de serem altamente eficientes em comparação a outros métodos de transporte (ZHANG; XIA, 2010), de construção simples, podendo ser instalados em condições ambientais variadas, bem como uma menor exigência em relação a operação, manutenção e supervisão (FEDORKO et al., 2014; MAZURKIEWICZ, 2008). De acordo com Qiao et al. (2013) e Qiao e Zhang (2010), características como as citadas anteriormente fazem com que transportadores de correia tenham um papel fundamental nos atuais sistemas de transporte contínuo de grande escala, como minério de ferro e carvão.

2.2 Principais partes e componentes do transportador de correia

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6177 (1999), define transportador de correia, ou, abreviadamente, "TC" (*belt conveyor* or BC), como sendo um dispositivo de estruturas metálicas com componentes mecânicos e elétricos. O objetivo principal consiste na movimentação ou transporte de matérias a granel, por meio de uma correia contínua (correia transportadora). O deslocamento da correia pode ser horizontal, inclinado (ascendente ou descendente), em curvas (côncavas ou convexas) ou ainda uma combinação de quaisquer desses perfis.

Para atender à demanda de várias áreas da indústria, os transportadores de correia permitem várias configurações, no entanto, os componentes de sua estrutura são os mesmos. Na Figura 1 é apresentada uma configuração típica de correia transportadora de minério de ferro (SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 1 - Configuração típica de transportadores de correia de minério de ferro

Fonte: Adaptado de Swinderman et al. (2009, p. 30).

O transportador possui duas polias: polia de tração e de cauda. O material é carregado na correia por meio de pontos de transferência, próximo à polia da cauda, e descarregado na extremidade oposta, perto da polia de tração.

A correia transportadora é definida, segundo ABNT NBR 6177 (1999), como sendo uma correia sem-fim, cujo movimento tem como objetivo produzir o transporte de materiais assentados sobre sua superfície. Sua estrutura consiste em uma carcaça, cobertura superior e cobertura inferior, podendo ser, em sua forma mais simples, de uma única camada com PVC (Polyvinyl Chloride - Policloreto de Vinil). Em aplicações, tais como indústria de mineração, em que há uma exigência de elevada resistência a tração e impacto e resistência ao rasgamento, sua composição é formada por uma matriz de materiais de borracha com cabos de aço ou fios de fibra em sua parte interna (FALKENBERG; WENNEKAMP, 2008; PROCEL, 2009; PHOENIX CBS, 2017) (Figura 2).

Figura 2 - Estrutura de uma correia transportadora de cabo de aço

Fonte: Adaptado de Phoenix CBS (2017).

A correia é usada para mover e suportar a superfície sobre a qual o material transportado passa. O tipo de correia a ser utilizado dependerá da natureza dos materiais a serem transportados.

Segundo Swinderman et al. (2009), a capacidade de carga é limitada pela velocidade e largura. Larguras variam de acordo com o material transportado. Valores típicos para transporte a granel estão entre 300 milímetros (0,3 metros) e 3000 milímetros (3 metros), podendo chegar a 5000 milímetros (5 metros), no caso do minério de ferro. Em relação ao comprimento, não há restrições.

Transportes de correia podem ser configurados em série, nivelados ou inclinados, construídos em linha reta ou curva, etc. Características como as apresentadas possibilitam a integração desse tipo de transporte em outros processos,

tais como trituração, triagem, transporte ferroviário de carga e descarga (GURJAR; YADAV; JAYASWAL, 2012).

2.3 Classificação

Segundo García (2016), transportadores de correia podem ser classificados em três grandes grupos, de acordo com a mobilidade de montagem: fixa, móvel e portátil.

2.3.1 Fixa

Transportadores de correia fixa possuem grande capacidade de transporte, baixo custo e uso amplo na indústria. São indicados para operações de localização definitiva, tais como mineração (Figura 3 e Figura 4), pedreiras, fábricas de cimento, portos e aeroportos, etc. (GARCÍA, 2016; TCI MANUFACTURING, 2017).

Figura 3 - Correia transportadora fixa

Fonte: TCI Manufacturing (2017).

Figura 4 - Correias transportadoras fixas sobre água

Fonte: TCI Manufacturing (2017).

2.3.2 Móvel

Transportadores de correia móvel são máquinas de escavação (Figura 5), utilizadas na operação de extração ou descarga contínua de minério a céu aberto. Possui a habilidade de mover-se ao mesmo tempo em que efetua a extração (GARCÍA, 2016; SANDVIK MINING, 2017).

Figura 5 - Correia transportadora móvel

Fonte: Sandvik Mining (2017).

2.3.3 Portátil

Transportadores de correia portátil (Figura 6) têm como principal característica poderem ser reposicionados conforme a necessidade de transporte. Para tanto, são fabricados em estrutura metálica, contendo rodas ou outro tipo de guia que permita a sua movimentação (GARCÍA, 2016; TCI MANUFACTURING, 2017).

Figura 6 - Correia transportadora portátil

Fonte: TCI Manufacturing (2017).

2.4 Vantagens

Nos últimos anos, sistemas de transporte contínuo de grande escala têm gerado novos conjuntos de requisitos, tais como equipamentos maiores e mais eficientes, sistemas que percorram distâncias cada vez mais longas, que possam superar percursos complexos a custos tão baixos quanto possível. Nessa seção, são feitas algumas considerações acerca destes conjuntos de requisitos.

2.4.1 Eficiência energética

Quanto à eficiência energética, é importante conhecer as alternativas.

Para tanto, nas seções a seguir serão apresentadas comparações entre transportadores de correias e outros meios de transporte.

2.4.1.2 Caminhões *versus* transportadores de correia

Destaca-se, inicialmente, nessa comparação, o fato de os transportadores de correia funcionarem continuamente sem perda de tempo nos pontos de carga e descarga de material, o que não ocorre com caminhões, que necessitam de agendamento e despacho (LUCAS, 2008).

De acordo com Nekoufar (2014), fatores como custo, segurança e tempo são determinantes em transporte de produtos a partir do fundo de um poço de mineração a céu aberto (Figura 7). Dois métodos têm sido utilizados nessa tarefa: caminhões de transporte e correias transportadoras.

Figura 7 - Poço de mineração a céu aberto

Fonte: Nekoufar (2014, p. 68).

Nekoufar (2014) efetuou a comparação levando em consideração o transporte do fundo de uma mina de 200m de profundidade a céu aberto até a superfície, por caminhão e transportadores de correia, com capacidade de transporte 2500 t/h de minério.

a) Caminhões de transporte:

- Dados de um caminhão:
 - Peso do caminhão: 150 t
 - Capacidade de carga: 180 t;
 - Potência do motor: 1500 kw;
 - Consumo: 250 L/h.
- Necessários 14 caminhões para transporte de 2500 t/h;
- Custo total: U\$5.180 /h.

b) Transportador de correia:

- Capacidade de carga: 2500 t/h;
- Velocidade: 3 m/s;
- Largura: 1500 mm;
- Consumo de energia: 1500 kW (calculado pelo cálculo de potência para correia transportadora);
- Preço da eletricidade: 0,3 kWh;
- Custo total: U\$ 450 /h.

Economicamente, os custos de transporte de caminhão atingem U\$5.180 /h, enquanto os de correia transportadora chegam apenas a U\$ 450 /h. Outros itens de economias são citados por Nekoufar (2014), tais como:

a) Capital inicial:

- Caminhão: 14 caminhões custariam U\$ 17 milhões;
- Transportador de correia: U\$ 500.000.

b) Pessoal operacional:

- Caminhão: 14 pessoas;
- Transportador de correia: 2 pessoas.

Em consequência, eliminam-se custos com manutenção de caminhões e construção de estradas, além de obter-se menor custo de consumo de energia e maior benefício ambiental, maior segurança operacional e menor custo com segurança.

2.4.2 Ferro Carajás S11D

O projeto Ferro Carajás S11D, em Canaã dos Carajás (PA), desenvolvido pela Vale, com estimativa de injetar na economia US\$ 19,67 bilhões em investimento, tem como objetivo transportar uma produção de 90 milhões de toneladas de minério de ferro por ano (Figura 8).

Figura 8 - Produção de minério de ferro no Complexo Minerador de Carajás (em milhões de toneladas)

Fonte: Vale (2013, p. 12).

O projeto se estenderá por 37 km em meio à Floresta Amazônica (VALE, 2013)(Figura 9). De acordo com os estudos efetuados pela Vale (2013), caso o projeto seguisse a linha de uma mineração convencional, seriam necessários 100 caminhões circulando. O estudo acrescenta que a adoção de transportador de correia permitirá reduzir em 50% as emissões de gases de efeito estufa, o equivalente a 130 mil toneladas de CO₂ por ano.

Figura 9 – Complexo Minerador de Carajás

Fonte: Vale (2013, p. 7).

2.5 Otimização de rotas

O transporte de correia pode ser configurado nos mais diversos comprimentos, tanto aberto como fechado, e utilizado em diversos tipos de terrenos, como horizontal, vertical, declive, aclone, seja em uso externo ou interno ao ambiente industrial (PROCEL, 2009).

Definir a otimização de rotas de correia transportadora em condições ambientais variadas torna-se um grande desafio, que tem impacto direto no custo de capital inicial do projeto, como também, a longo prazo, pode se refletir nos custos operacionais e de manutenção (ALSPAUGH; DEWICKI, 2003).

2.5.1 Transportador de correia – Saara

Segundo Swinderman et al. (2009), transportadores de correia podem ser instalados em condições ambientais variadas, sobre terrenos difíceis ou áreas de

difícil acesso, tais como acima ou abaixo do solo, em declives íngremes, ao redor de encostas, sobre colinas e vales, através de corpos de água.

García (2016) cita, como exemplo, o transportador de correia que liga as minas de Bou Craa ao porto da cidade de El-Aaiun no Saara. Considerado o mais longo entre os transportadores de correia do mundo, possui 100 km de extensão e capacidade de carregar 2000 toneladas de rochas fosfáticas por hora (Figura 10). Devido às perdas de material, decorrentes dos fortes ventos da região, é possível identificar, na foto de satélite, a correia transportadora por meio de uma faixa branca de fosfato que se espalha pelo deserto.

Figura 10 – Correia Transportadora Sahara Ocidental

Fonte: Adaptado de: a) Google Earth (2017); b) Nasa (2017).

2.5.2 Correia transportadora – Elevada

A Índia detém uma grande reserva de calcário e xisto nas colinas do leste de Khasi. O alto volume de produção desses minérios, cerca de 800 toneladas por hora, é transportado internacionalmente do estado de Meghalaya, na Índia, até Chhatak, em Bangladesh, por meio de 17 km de transportadores de correia (Figura 11). O transporte foi instalado em um nível elevado, sobre cavaletes, sendo que, dos 17 km de comprimento, 7 km estão na Índia e o restante, 10 km, em Bangladesh. Para

atender à necessidade de transporte de 800 t/h, utilizou-se uma correia de cinto de cabo de aço de 800 mm de largura, a uma velocidade de 4 m/s, com 10 curvas horizontais e verticais (VIKRAM; MUKHOPADHYAY, 2008; KAUSHIK, 2014).

Figura 11 - Correia transportadora Índia - Bangladesh

Fonte: Kaushik (2014).

No Brasil, a unidade da Cimenteira Holcim Brasil, localizada em Barroso (MG), contará com um sistema aéreo de materiais a granel por correias transportadoras sustentadas por cabos (Figura 12). O sistema terá 7,2 km de extensão e 50 m de altura, com uma previsão de transporte de cerca de 1500 t/h a uma velocidade de 4,1 m/s (COLOGNA, 2015).

Figura 12 - Correia transportadora - Sistema aéreo - Cimenteira Holcim Brasil

Fonte: Cologna (2015, p. 16)

2.5.3 Curvas

Logicamente, é possível deduzir que o modo mais eficiente de transporte de material entre dois pontos é um trajeto em linha reta. O desafio está em relação ao percurso a longa distância. Nesse sentido, o projeto fica mais complexo, devido a obstáculos naturais e artificiais, que tornaram improvável o transporte diretamente entre dois pontos. A definição do trajeto a ser percorrido terá impacto direto nos custos de capital inicial do projeto, custos operacionais e manutenção a longo prazo (ALSPAUGH; DEWICKI, 2003). Na Figura 13 é exibido dois transportadores de correia em linha reta, mas em sentido perpendicular, com um ponto de transferência interligando os dois.

Figura 13 - Ponto de transferência com mudança de direção

Fonte: Kessler e Prenner (2009, p. 185).

Avanços significativos da tecnologia têm possibilitado otimizar o desenvolvimento de sistemas transportadores de correia em múltiplas curvas horizontais e verticais, reduzindo, dessa forma, o número de pontos de transferência e, conseqüentemente, os custos de manutenção.

Dessa forma, sistemas com curvas têm sido cada vez mais comuns. Um exemplo disso é descrito por Contitech AG (2017), que cita o transporte de calcário entre uma pedreira, a 6,2 km de distância do ponto inicial, e uma fábrica de cimento Vicat, em Montalieu, na França, com múltiplas curvas (Figura 14).

Figura 14 – Trajeto parcial entre pedreira e fábrica de cimento Vicat

Fonte: Adaptado de Contitech AG (2017).

A utilização de transporte de correia em curvas foi possível a partir de estudos e adoção de novas tecnologias que permitem compensar gravidade, atrito e forças centrífugas que agem no interior da curva (Figura 15). Ajustes verticais dos roletes de suporte da correia transportadora tendem a equilibrar essas forças (ALSPAUGH; DEWICKI, 2003).

Figura 15 - Equilíbrio de forças

Fonte: Adaptado de Alspaugh e Dewicki (2003, p. 4).

2.5.4 Transportador de correia tubular

Além da conformidade com o terreno, ao longo dos anos, surgiu a preocupação com a degradação do material e a proteção ambiental, o que impulsionou novas abordagens de transferência de materiais. Segundo Ramjee¹ e Staples (2015 *apud* ZHENG et al., 2016), no início dos anos 1980, a Japan Pipe Conveyor (JPC) desenvolveu um transportador de correia tubular. Esse tipo de correia transportadora permite uma configuração tubular, protegendo o material transportado das intempéries (ação dos ventos, chuvas, etc.), além de impedir a emissão de poeira ou outras poluições ambientais. O formato tubular proporciona maior flexibilidade transversal, possibilitando trajetos de transportes com curvas mais acentuadas e elevações íngremes. Exibe-se na Figura 16 a estrutura de transportador de correia tubular.

¹ RAMJEE, S.; STAPLES, P. Pipe conveyors for infrastructure projects: innovative solution for conveyor systems, Bulk Solids Handl. pp. 20–27, 2015.

Figura 16 – Configuração tubular: a) conceito geral e arranjo estrutural;
b) Instalação industrial de transportadores de tubos; c) Ponto de carga.

Fonte: Adaptado de Zheng et al. (2016, p. 2).

Entre as diversas aplicações possíveis da correia transportadora tubular, as características de maior flexibilidade transversal têm favorecido sua implantação em projetos de construção de túneis. O projeto de extensão do metrô de Barcelona, túnel de 10,9 metros de diâmetro, conta com um transportador tubular de 4,7 km de comprimento e um segundo, a ser instalado, de 8,39 km (ALSPAUGH, 2004).

Ainda de acordo com Alspaugh (2004), a construção do túnel de esgoto do Metropolitan St. Louis (Missouri), denominado The Baumgartner, com 6,18 km de extensão e 3,6 m de diâmetro, será equipada com um transportador de correia tubular de 600 mm de largura, com 4 motores intermediários (Figura 17).

Figura 17 - a) Planta do túnel de Barcelona; b) Planta do túnel The Baumgartner

Fonte: Adaptado de Alspaugh (2004, p. 4).

2.6 Conclusão

Nesse capítulo, foram apresentadas, inicialmente, a evolução e as principais características da correia transportadora. Em seguida, descreveram-se as principais vantagens do uso do transportador de correia, principalmente em relação a eficiência energética, adaptação a percursos complexos e longos e comparação de custos com relação a outros meios de transporte.

O próximo capítulo aborda os principais fatores inerentes ao processo industrial que podem ocasionar danos à correia transportadora e ações adotadas para evitá-los ou minimizá-los.

CAPÍTULO 3

3 FATORES QUE PROPICIAM DANOS À CORREIA TRANSPORTADORA

Segundo Swinderman et al. (2009), a vida útil das correias transportadoras é influenciada por desgaste natural de uso e danos evitáveis inerentes ao processo industrial. O desgaste natural ocorre devido ao funcionamento em condições de alta exigência, tais como ambientes sujos, calor intenso, umidade baixa, etc.

Ações de gerenciamento corroboram para minimizar ou atingir quantidades aceitáveis de desgaste e, dessa forma, prolongar a vida da correia. Em relação aos danos evitáveis, podem ser minimizados por meio de projetos de equipamentos adequados e gerenciamento de manutenção (PROCEL, 2009).

Nesse capítulo, são feitas algumas considerações acerca dos fatores que influenciam no desgaste ou danos à correia transportadora.

3.1 Ponto de transferência

Ponto de transferência é um equipamento composto de chute, ou calha, que efetua a ligação entre sistemas integrados de transportadores contínuos (Figura 18). Segundo a ABNT NBR 6177 (1999), o chute ou calha é um dispositivo destinado a receber o material transportado e direcioná-lo à correia transportadora.

Figura 18 - Ponto de transferência típico

Fonte: Swinderman et al. (2009, p. 32).

Nesse ponto, pode acontecer de o material ser carregado inadequadamente, causando um fator ou uma combinação deles, que podem causar danos ou desgastes prematuros às correias (VELMURUGAN et al., 2014; TAYADE et al., 2015; SWINDERMAN et al., 2009):

- a) Força de impacto e atrito de materiais;
- b) Detritos alojados entre a correia e demais componentes;
- c) Desalinhamento da correia.

3.1.1 Força de impacto e atrito de materiais

A força de impacto e a velocidade com que os materiais são depositados no ponto de transferência são potenciais geradores de sérios danos à superfície da correia transportadora, influenciando diretamente em sua vida útil (TAYADE et al., 2015). O impacto de materiais grandes e pontiagudos pode causar, sobre a cobertura superior da correia, arranhões, rasgos, cortes e perfurações (Figura 19). A ruptura completa da correia pode ocorrer em situações de impacto extremo (SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 19 - Danos de impacto

Fonte: Adaptado de Swinderman et al. (2009, p. 32).

A implantação de equipamentos e técnicas tem auxiliado na solução do problema. Segundo CEMA Standard 575–2000² (apud CECALA, et al., 2012), diminuindo a distância de transferência, por sua vez, diminuirá o impacto do material sobre a correia transportadora (Figura 20).

Figura 20 - Cálculos para determinação da carga de impacto de material em um ponto de transferência do transportador [Norma CEMA 575-2000]

Fonte: CEMA Standard 575–2000² (apud CECALA, et al., 2012, p. 137).

Outra opção adotada tem sido a utilização de sistemas amortecedores de impacto, como amortecimento de borracha, para absorver o choque entre o material e a superfície da correia no ponto de transferência (TAYADE et al., 2015; DUNLOP, 1994). Como exemplo de sistemas amortecedores, destacam-se mesa de impacto e rolete de impacto (Figura 21). A mesa de impacto pode ser constituída com uma camada superior lisa com o objetivo de permitir a movimentação mais suave da correia transportadora. Camadas adicionais de borracha podem ser incorporadas ao sistema para a absorção de impactos mais severos (METSO, 2016; CECALA et al., 2012; PROCEL, 2009). Roletes de impacto são dotados com materiais elásticos que, como as mesas de impacto, permitem absorver o choque resultante do material com a

² CEMA Standard 575–2000. Bulk material belt conveyor impact bed/cradle selection and dimensions. [http://www.cemanet.org/publications/previews/CEMA%20Standard%20575%20– 2000pv.pdf].

correia transportadora (ABNT NBR 6177:1999, 1999; PROCEL, 2009; GOODYEAR, 2017; SUPERIOR-IND, 2017).

Figura 21 - Sistemas amortecedores de impacto: a) Rolete de impacto;
b) Mesa de impacto.

(a)

(b)

Fonte: Superior-Ind (2017, p.24 e 41)

3.1.2 Atrito de materiais

Fatores que podem ter influência acentuada sobre o índice de abrasão da superfície da correia transportadora estão relacionados com sua aceleração e o tipo de material transportado (PROCEL, 2009). Exibe-se na Tabela 1 a abrasividade de diversos tipos de materiais.

Tabela 1 - Abrasividade de vários tipos de materiais.

Pouco Abrasivo	Abrasivo	Muito Abrasivo	Extremamente Abrasivo
Cal	Areia	Areia com arestas vivas	Basalto
Carvão vegetal	Bórax	Baixita	Cacos de vidro
Cereais	Carvão mineral	Cascalho com arestas vivas	Cassiterita
Madeira	Cascalho	Calcário	Granito
Lenha	Cimento	Clinker	Minério de Ferro
Talco	Pedregulho	Coque	Minério de Manganês
	Sal	Dolomita	Pedra britada
		Escória	Quartzo
		Minério de Cobre	
		Pedregulho com arestas vivas	
		Rocha de Fosfato	
		Sinter	
		Xixto	

Fonte: Copabo³ (apud PROCEL, 2009, p.47).

³ Copabo: Distribuidor de Correias e Mangueiras Industriais Goodyear

Segundo Williams (2011), em geral, o desgaste da superfície da correia ocorre 80% sobre a cobertura superior e 20% sobre a inferior. O motivo pelo qual há um desgaste maior da cobertura superior está relacionado à ação abrasiva dos materiais a serem transportados (Figura 22). Atritos de carvão, areia e cascalho geram maior desgaste abrasivo e perda de material da cobertura da correia, enquanto objetos pesados e/ou pontiagudos podem causar cortes e rasgos (DUNLOP, 1994). Por essa razão, são desenvolvidas correias transportadoras com diferentes tipos de cobertura resistente à abrasão (WILLIAMS, 2011). O desgaste da cobertura inferior está relacionado principalmente ao contato de fricção com as polias de tração e da cauda, roletes, etc.

Figura 22 - Atrito relativo à aceleração

Fonte: Dunlop (1994, p. 12.27)

Efetuar a alimentação do material no ponto de transferência na mesma direção e o mais próximo possível da velocidade do transportador contribui para a vida útil da correia (CECALA et al., 2012). A velocidade da correia é outro fator importante a ser observado em relação ao material transportado. Segundo Procel (2009), altas velocidades são incompatíveis com materiais secos e muito finos, devido ao fato de poder gerar a formação de pó. No caso de matérias pesados e pontiagudos, velocidades altas podem causar abrasão ou danos maiores à cobertura da correia e seu rápido desgaste (WILLIAMS, 2011). Segundo Procel (2009), para cada tipo de material a granel há uma velocidade máxima recomendada, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Velocidades máximas recomendadas em m/s – materiais a granel

Largura da correia (mm)	Cereais e outros materiais de escoamento fácil. Não abrasivos	Carvão, terra, minérios desagregados, pedra britada fina pouco abrasiva	Minérios e pedras duros, pontiagudos pesados e muito abrasivos
400	2,5	1,6	1,6
500 – 800	3,0 – 3,6	2,5 – 3,0	1,8 – 3,0
800 – 1000	3,6 – 4,1	3,0 – 3,6	3,0 – 3,3
1200 – 1600	4,1 – 5,0	3,6 – 4,1	3,3 – 3,8

Fonte: Procel (2009, p. 30).

3.1.2 Detritos alojados entre a correia e demais componentes

3.1.2.1 Derramamento de material

A falta de controle eficiente do material depositado na correia transportadora através do ponto de transferência ou ao longo do percurso de transporte pode ocasionar arremesso ou derramamento de material (METSO, 2016). De acordo com Cecala et al. (2012), o derramamento tem maior índice de ocorrência no ponto de transferência (Figura 23) devido a diversos fatores, tais como carregamento descentralizado, falta ou deficiência do sistema de proteção contra derramamento de material entre outros (GOODYEAR, 2017).

Figura 23 - Derramamento de material

Fonte: Cecala et al. (2012, p. 134).

No caso específico do percurso do transporte, Goodyear (2017) e Camargo (2012) relacionam diversos fatores para o derramamento: correia descentralizada em

torno da polia da cauda ou na área de carga, deslizamento da correia, excesso de material, desgaste excessivo da borda, bordas quebradas, vibração, entre outros.

O travamento de polias e roletes está entre os problemas comuns relacionados com o derramamento de material. Componentes travados impedem que a correia se movimente livremente, causando desgastes acelerados da borracha ou até mesmo incêndios. Em situações de travamento mais crítico, pode ocorrer a quebra de polias ou roletes (Figura 24) com grandes chances de sérios danos ao transportador, como um rasgo prolongado ao longo da correia (CAMARGO, 2011)

Figura 24 - Rolete quebrado

Fonte: Swinderman et al. (2009, p. 5).

Diversas ações são adotadas para impedir o derramamento de material. No ponto de transferência, são instalados sistemas de vedação. Guias laterais são posicionadas na saída do ponto de transferência para reter o material e permitir que o mesmo se assente à medida que a correia se desloca. Com relação aos roletes, adota-se a abordagem de compatibilizá-los com borrachas de desgaste de qualidade apropriada, como também resistência adequada à contaminação do material a ser transportado (CAMARGO, 2011).

3.1.2.2 Fragmentos metálicos no fluxo de materiais

Outro fator de danos à correia transportadora está relacionado a fragmentos metálicos que, involuntariamente, tornam-se parte do fluxo de materiais, tais como dentes de escavadeira, chapas de revestimento do ponto de transferência, porcas,

parafusos, eletrodos, ferramentas, etc. (ALDRICH; ZHANG, 2014; ASSOCIATION FOR RUBBER PRODUCTS MANUFACTURERS, 2011; LIMA, 2014; CASAGRANDE, 2009; PROCEL, 2009).

Os objetos metálicos são extraídos do fluxo de materiais utilizando um dispositivo eletromagnético, denominado polia magnética (Figura 25). A polia magnética possui um núcleo gerador de campo magnético e uma correia giratória. O núcleo atrai objetos metálicos presentes no fluxo do material, enquanto a ação do movimento da correia giratória retira os objetos do núcleo e os lança a uma caixa coletora (PROCEL, 2009).

Figura 25 - Polia magnética

Fonte: Procel (2009, p. 56).

3.1.2.3 Obstrução do sistema de vedação

O ponto de transferência possui um sistema de vedação com o objetivo de evitar que materiais e poeiras sejam arremessados ou derramados para fora da correia transportadora. O acúmulo de materiais no ponto de transferência, em alguns casos, causa a obstrução do sistema de vedação (Figura 26). O material alojado formará uma região de alta pressão, que, conseqüentemente, causará o desgaste excessivo da correia, podendo gerar fissuras em sua superfície e, em casos mais críticos, rasgos longitudinais (ARAÚJO, 2010; DUNLOP, 1994; SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 26 – Detritos alojados entre a esteira e o sistema de vedação:
a) Obstrução b) Acúmulo de material; c) Fissuras; d) Rasgos longitudinais.

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Swinderman et al. (2009, p. 50 e 51) e Dunlop (1994, p. 7.1).

3.1.2.4 Carryback

Após a descarga do material, pode ocorrer de pequenas quantidades de materiais aderirem à correia e serem transportadas de volta ao ponto de transferência. Esse processo é conhecido como *carryback*. O *carryback* ocorre com mais frequência em materiais pegajosos (Figura 27). Ocasionalmente, ao longo do percurso de retorno, a correia poderá coletar e transportar materiais derramados (METSO, 2016; SWINDERMAN et al., 2009; ARAÚJO, 2010; DUNLOP, 1994).

Figura 27 - Carryback.

Fonte: Swinderman et al. (2009, p. 198 e 246).

No retorno ao ponto de transferência, a correia transportadora passará por um número de polias e roletes e, caso os materiais não sejam removidos, podem gerar avarias a esses componentes. Consequentemente, a correia transportadora também poderá sofrer danos do tipo desalinhamento da correia, derramamento de material, rasgos, perfurações, etc. (METSO, 2016; LIMA, 2014; CASAGRANDE, 2009; SWINDERMAN et al., 2009; ARAÚJO, 2010; DUNLOP, 1994).

A solução adotada para o *carryback* é a utilização de sistemas de limpeza da correia. Entre os sistemas de limpeza, destacam-se: raspador convencional, raspador de lâminas múltiplas, raspador de escova, limpador de jato d'água, limpador em diagonal, limpador em "V", limpador em arco, rolete helicoidal, entre outros (Figura 28) (ABNT NBR 6177:1999, 1999; METSO, 2016; SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 28 - Sistemas de limpeza: a) diagrama de raspadores; b) raspador; c) limpador em "V"; d) limpador em "V".

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Metso (2016, p. 19 e 24) e Swinderman et al. (2009, p. 246 e 247).

3.1.3 Desalinhamento da correia

Por padrão, o movimento da correia transportadora segue o alinhamento da estrutura de transporte. Quando isso não ocorre, tem-se o desalinhamento da correia. Segundo Metso (2008), Metso (2016), Araújo (2010), Coelho (2010) e Procel (2009), o desalinhamento pode ser causado por diversos fatores, tais como acúmulo de materiais nos roletes e polias, desgaste desuniforme dos roletes, estrutura de transporte fora do alinhamento, carregamento descentralizado da correia (Figura 29). Gurjar et al. (2012) destacam ainda ajuste inadequado e manutenção deficiente e vibração da correia transportadora.

Figura 29 - Carregamento descentralizado

Fonte: Metso (2008, p. 1).

Caso o desalinhamento não seja detectado e corrigido em tempo hábil, pode ocasionar o toque das bordas da correia na estrutura transportadora ou em roletes (Figura 30). Essa situação tende a causar desgastes ou rasgo de suas bordas. A severidade dos danos tem como consequência desde a redução da largura da correia, o que afetará a capacidade de transporte nominal do transportador, até sua inutilização por completo (METSO, 2008; SWINDERMAN et al., 2009; ARRUDA, 2015; METSO, 2016).

Figura 30 - Correia desalinhada tocando a estrutura transportadora

Fonte: Metso (2008, p. 1).

Diversas técnicas e tecnologias são empregadas para prevenir o desalinhamento da correia. Segundo Metso (2008), estes incluem a verificação e ajuste do alinhamento e do nivelamento da estrutura, tanto no comprimento, como na lateral, e ajustes de polias e roletes, de modo que estejam todos paralelos entre si e

permaneçam perpendiculares à linha de centro da correia transportadora. Goodyear (2017) salienta a instalação de roletes auto ajustáveis, os quais orientam o alinhamento de acordo com a força aplicada da própria correia. Outra forma de prevenção é a manutenção do material alimentado no centro da correia transportadora e na mesma direção de deslocação e velocidade de acordo com Cecala et al. (2012). A correção do desalinhamento tem sido feita com a adoção de roletes auto alinhadores, desenvolvidos para atuarem sobre o movimento recebido da correia transportadora. Conforme a movimento tende a um deslocamento lateral, o rolete atua para reconduzir a correia de volta ao centro (Figura 31).

Figura 31 - Roletes auto alinhadores: a) Modelo Superior-Ind; b) Modelo Metso.

(a)

(b)

Fonte: Superior-Ind (2017, p. 20) e adaptado de Metso (2016, p. 3).

3.2 Conclusão

O capítulo abordou os principais fatores inerentes ao processo industrial que podem ocasionar danos à correia transportadora e ações adotadas para evitá-los ou minimizá-los.

Observa-se que, apesar das ações adotadas, as falhas ainda acontecem. Diante disso, conclui-se que abordagens adicionais para diminuir o impacto dos danos são necessárias, tais como a aplicação de sistemas de monitoramento e controle de falhas da correia transportadora, tópico do próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

4 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE FALHAS EM CORREIAS TRANSPORTADORAS

No capítulo anterior, abordaram-se problemas e soluções para minimizar danos evitáveis em correias transportadoras. Apesar de toda ação adotada, podem ocorrer falhas de operação, causando avarias à correia, como rasgos, cortes e perfurações. Problemas dessa natureza, se não diagnosticados em um curto espaço de tempo, podem causar sérios danos, como o prolongamento do rasgo ao longo da correia (DESHMUKH et al., 2014; CHUNXIA; SI, 2011; PROCEL, 2009) (Figura 32).

Figura 32 - Danos à correia: a) corte longitudinal; b) rasgo interno; c) rasgo da borda; d) perfuração.

(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Adaptado de Swinderman et al. (2009, p. 32 e 53) e Araújo (2010, p. 76 e 81).

Pereira (2015) argumenta que, em levantamento feito na Vale Carajás, na usina 1, no período de 1º/10/2013 a 31/12/2013, houve 2076 paradas, sendo 359 preventivas, 265 elétricas e 1452 paradas mecânicas. O transportador de correia foi o equipamento com maior número de paradas mecânicas, com um total de 831 registros.

Dentre os componentes do transportador de correia, a correia transportadora acarreta maior valor de investimento e manutenção. Segundo Gupta (2014) e Gurjar et al. (2012), o valor da correia varia entre 25% e 50% do custo total desse meio de transporte. Já Arruda (2015), Coelho (2010) e Araújo (2010) destacam que falhas nesse componente acarretam elevados custos de manutenção e perda de produção para as empresas. Araújo (2010), em seu estudo na Samarco Mineração S/A - Mina Germano, demonstra que, do total de paradas por falha de manutenção, 35% são referentes às correias transportadoras (Figura 33).

Figura 33 - Tempo de parada referente aos componentes da correia transportadora

Fonte: Araújo (2010, p. 55).

Diante desses fatores, esforços têm sido empregados em sistemas de monitoramento e controle da correia transportadora com o objetivo de diagnosticar falhas de operação que possam gerar um longo período de tempo de inatividade do

sistema de transporte, ameaçar a segurança ou ainda gerar perdas financeiras significativas.

Atualmente, uma grande quantidade de pesquisas tem desenvolvido uma gama de métodos para o monitoramento de correia transportadora: sistemas mecânicos, sistemas de ultrassom, sensor fotoelétrico de infravermelho, sensores de rádio frequência, sensores inteligentes incorporados às correias transportadoras, sistema de monitoramento da pressão da correia, análise de sinais de sensores por meio de sistemas Neuro-Fuzzy, sistemas baseados em processamento de imagem, análise de imagens de Raio-X com ou sem o auxílio de redes neurais, entre outros.

Nessa seção, são feitas algumas considerações acerca dos sistemas anteriormente mencionados, tanto no âmbito acadêmico, como no industrial.

4.1 Sistemas mecânicos

4.1.1 Chaves elétricas

Um grande número de dispositivos operados mecanicamente é utilizado com o objetivo de evitar ou minimizar os danos causados por rasgos longitudinais da correia transportadora. Nicolay et al. (2004) destacam que a maioria desses dispositivos possui o mesmo princípio de funcionamento, como demonstrado na Figura 34. Botões de alarme de cada lado da correia transportadora são conectados por cabos. Caso haja rasgos ou cortes por materiais pontiagudos que venham a atravessar a correia, o cabo é carregado e, por conseguinte, o botão de alarme é acionado.

Figura 34 - Sistema mecânico de detecção do rasgo da correia

Fonte: Transmission Supply and Service Company Pty Ltd⁴ (*apud* NICOLAY, et al., 2004, p. 333).

⁴ Transmission Supply and Service Company Pty Ltd. <http://www.tssco.com.au/html/tss.htm>, Sep. 2004.

Dispositivos semelhantes são apresentados por outros autores, como Lima (2016, 2010a) e Casagrande (2010) (Figura 35), em que um fio de nylon ou cabinho de aço (3) é conectado a um sensor de proximidade indutivo (1). Queda de materiais, como minerais, carvão, granulados, entre outros, sobre o fio de nylon ou cabinho de aço, como também tiras ou cabos de aço, acionam o sensor indutivo.

Figura 35 - Sistema mecânicos detecção do rasgo da correia: a) chave de detecção de rasgo em correia transportadora; b) chave de detecção de rasgo em correia transportadora do tipo carga e retorno.

Fonte: Lima (2010a, p. 1) e Lima (2016, p. 1).

4.1.2 Cavalete de vidro

Lima (2010b) apresenta uma chave de detecção de rasgo em correia transportadora de cavalete de vidro que é instalada debaixo do ponto de transferência (Figura 36). O sistema é composto por um ou até três cavaletes de vidro, com espessura de 2mm e com comprimento igual aos cavaletes dos rolos de impacto da correia. Um reservatório preenche internamente o cavalete com água. O sistema é dotado de dois sensores de proximidade indutivos (item 2). O primeiro tem a função de monitorar a água interna do cavalete e sinalizar em casos de evaporação ou vazamentos acidentais. O segundo é acionado pela quebra do cavalete decorrente da queda de materiais devido a rasgos na correia transportadora.

Figura 36 - Chave de detecção de rasgo em correia transportadora de cavalete de vidro

Fonte: Lima (2010b, p. 1).

4.1.3 Bandeja

Outra abordagem de sistemas mecânicos para detecção de rasgo são as bandejas. Na Figura 37 é apresentado o princípio de funcionamento baseado no equilíbrio entre a bandeja de tela (1) e o braço de acionamento (7). O grau de sensibilidade do equipamento é ajustado pela posição do contrapeso (8), instalado no braço de acionamento. Composta por um conjunto de sensores, a bandeja de tela é instalada 70 mm abaixo da correia transportadora e a uma distância de 3 a 5 metros após a saída do chute. A ocorrência de queda de material devido a rasgos ou perfurações altera o equilíbrio do sistema que acionará o sensor de sinalização (9) (LIMA, 2015).

Figura 37 – Sistema de bandeja de tela

Fonte: Lima (2015, p. 1)

Segundo Silva e Machado (2016), os componentes mecânicos, devido à movimentação com o deslocamento da bandeja, podem ficar contaminados com a queda do material transportado. Para solucionar esse tipo de problema, Silva e Machado (2016) apresentam um modelo de bandeja acionada por sensor de vibração (Figura 38). A queda do material transportado desloca a bandeja, acionando os sensores de vibração, que enviam um sinal a um processador. A amplitude da vibração obtida é comparada com a amplitude da vibração de referência. Caso o resultado extrapolar a amplitude máxima configurada, o sistema efetua a parada da correia transportadora.

Figura 38 - Bandeja acionada por sensor de vibração

Fonte: Silva e Machado (2016, p. 1).

4.2 Sistemas eletrônicos

Casagrande(2009, 2010) observa que os sistemas mecânicos demandam maior tempo de manutenção preventiva e corretiva para um correto funcionamento. Já Lima (2014) alerta para alguns inconvenientes decorrentes da utilização de tais sistemas:

a) Chaves elétricas: desregulagem recorrente, acidentes e danificação de componentes decorrente do lançamento do cabo de aço ao ser rompido. Perda do isolamento elétrico devido a ambientes agressivos, podendo acarretar uma série de problemas como choques elétricos, centelhamento dos contatos, possibilidade de incêndio ou explosão devido a vapores ou gases inflamáveis presentes no ambiente.

b) Bandeja: fabricação trabalhosa, elevado custo de manutenção, baixa confiabilidade, desgastes de componentes como rolamentos e mancais, deterioração da bandeja e chaves elétricas.

4.2.1 Componentes incorporados na correia

Essa abordagem consiste em incorporar, à estrutura da correia, componentes em intervalos regulares que possam ser detectados por um equipamento externo. Segundo Nicolay et al. (2004), sistemas baseados no princípio da indução são considerados um dos mais utilizados na detecção de rasgos em correias transportadoras. Exibe-se na Figura 39 o princípio de funcionamento do referido sistema. Bobinas condutoras, com dimensões próximas da largura da correia, são vulcanizadas em intervalos regulares ao longo da correia. Próximo à borda, é posicionado um transmissor que emite ondas eletromagnéticas, induzindo uma tensão na bobina, que, por sua vez, gera um campo magnético alternado. Um receptor posicionado na borda posterior do transmissor detecta o campo magnético gerado. No caso de um rasgo da correia, a bobina será danificada, interrompendo o sinal entre o transmissor e o receptor. Consequentemente, o sistema irá cessar a movimentação da correia (ASSOCIATION FOR RUBBER PRODUCTS MANUFACTURERS, 2011; PANG, 2010; PANG; LODEWIJKS, 2006; NICOLAY; TREIB; BLUM, 2004). Um ponto a ser observado nessa técnica é em relação ao custo. Segundo Lima (2014), o fato

de a correia ser construída de forma especial para acomodar as bobinas transversais ao longo do seu comprimento eleva o custo de fabricação da correia.

Figura 39 - Detector de rasgo por indução

Fonte: Pang (2010, p. 11)

Nicolay et al. (2004) implementam uma versão utilizando RFID (*Radio Frequency Identification* - Identificação por Radiofrequência) (Figura 40).

Figura 40 - Sistema de detecção de rasgo RFID

Fonte: Nicolay et al. (2004, p. 334)

RFID tem sido frequentemente utilizada no setor de logística para identificação de produtos em fluxos de mercadorias em áreas de armazenamento. O sistema incorpora *transponders* (*transmitter-responder*), *loops* condutores na correia transportadora em intervalos regulares. A sequência de identificação de cada *transponder* é previamente armazenada em um computador. Dois detectores são instalados 150 mm abaixo da correia transportadora. Rasgos são identificados de duas formas: a primeira forma consiste em comparar a sequência de código detectada

com a armazenada previamente. Caso ocorra um rasgo, haverá uma divergência na sequência, que resultará na interrupção da correia transportadora. A segunda forma compara o tempo entre duas marcas consecutivas. Se o tempo calculado em função da velocidade real não corresponder ao tempo medido, significa que houve um rasgo, gerando, assim, a interrupção da correia.

4.2.2 Detector ultrassônico

Rasgos de correias têm sido detectados por dispositivos que operam com ondas de ultra-som (Figura 41). Rolos em contato com a correia são utilizados para propagar e receber o sinal emitido. A correia transportadora recebe o sinal ultrassônico, proveniente de um transmissor, através do rolo central e os propaga até os rolos colaterais. Caso haja um rasgo longitudinal, haverá uma diferença significativa da potência do sinal, acarretando a parada imediata da correia. O ponto crítico desse sistema está no acoplamento das ondas de alta frequência com o material da correia.

Para contornar as situações em que a condutância não é suficientemente alta para a propagação das ondas ultrasônicas, devido a fatores como ar, poeira, materiais soltos, entre outros, são utilizados sistemas de água ou rolos especiais com membrana de fluido. Essa abordagem, além de elevar os custos com manutenção, pode falhar na detecção de rasgos ou perfurações da correia, devido aos mesmos serem preenchidos com a mistura do material transportado com água (NICOLAY; TREIB; BLUM, 2004).

Figura 41 - Detector ultrassônico.

Fonte: Nicolay et al. (2004, p. 334)

Beltscan Systems PTY LTD. (2017) e Association For Rubber Products Manufacturers (2011) apresentam um sistema que, através do monitoramento da largura da correia por sondas de ultrassom, detecta o rasgo na correia transportadora. Quando ocorre um rasgo, o peso do material transportado tende a afastar as seções rasgadas da correia ou efetuar a sua sobreposição. Esses eventos alteram a largura da correia, que é detectada pelas sondas, gerando um sinal para o PLC (*Programmable Logic Controller* - Controlador Lógico Programável), interrompendo, assim, a operação da correia (Figura 42).

Figura 42 - monitoramento da largura da correia por ultrassom

Fonte: Beltscan Systems PTY LTD. (2017)

A característica da largura da borda que, em operação, mantém-se constante e se altera na presença de rasgo é utilizada na abordagem de Tie-Zhu et al. (2011). Tie-Zhu et al. (2011) posicionam sensores em ambos os lados da correia transportadora para medirem sua largura (Figura 43).

Figura 43 – Posicionamento dos sensores de alcance

Fonte: Tie-Zhu et al. (2011, p. 143).

O sinal dos sensores é processado por um MCU 8051 e o resultado obtido é enviado, por interface de comunicação, ao computador, para análise de dados, reconstrução de imagem, armazenamento e impressão. Mudanças na largura da correia acima do limite configurado farão com que o 8051 envie alarmes para a parada do transportador (Figura 44).

Figura 44 - Diagrama do sistema

Fonte: Tie-Zhu et al. (2011, p. 142).

Utilizando o monitoramento em tempo real da pressão da correia transportadora, Chunxia e Si (2011) apresentam um método para monitorar a ocorrência de rasgos. Na figura 45 destaca-se os elementos principais do sistema: sensores de pressão no formato de rolo e processador de sinal MSP430 MCU.

Figura 45 - Sistema de detecção de rasgo por pressão

Fonte: Chunxia e Si (2011, p. 62).

No experimento dos autores, seis sensores de pressão, no formato de rolos, são posicionados sob a correia (Figura 46).

Figura 46 - Instalação dos sensores de pressão

Fonte: Chunxia e Si (2011, p. 62).

Em estado normal de funcionamento, a correia mantém pressão constante sobre os sensores, gerando valores dentro da faixa de equilíbrio, como ilustrado pela curva “a” da figura 47. Quando um corpo estranho inicia o processo de ruptura da correia, uma pressão adicional é exercida sobre ela, elevando o sinal detectado pelos sensores, curva “b”. Sinais de saída dos sensores são enviados ao processador, que, em caso de condição de corte longitudinal, efetua a parada da correia transportadora. Dados obtidos das simulações detectaram que o menor tempo para perfurar a correia é em torno de 300 ms.

Figura 47 – Curva de pressão da correia transportadora: a) estado normal de funcionamento; b) condição de corte longitudinal.

Fonte: Chunxia e Si (2011, p. 61).

4.2.3 Sistemas de raio-X

O raio-X, amplamente utilizado em diagnósticos médicos, tem sido aplicado em diversas áreas, como também na indústria (LI; MIAO; ZHANG; 2011). Segundo Li, Miao e Zhang (2011), sistemas baseados em raios-X têm sido empregados na detecção de falhas em correia transportadora. Tais sistemas se baseiam em equipamentos de raios-X, por onde a correia transportadora passa a uma velocidade constante e cujas imagens bidimensionais obtidas são armazenadas linha por linha.

Li, Miao e Zhang (2011) destacam que o sistema típico de raios-x efetua apenas a obtenção das imagens, sem a detecção automática de defeitos. Falhas como perfurações dependem da detecção manual de fendas brancas nas imagens coletadas.

Diante desse cenário, Li, Miao e Zhang (2011) propõem um método de detecção automática de falhas na correia transportadora. O método, denominado RB (*regular bands* - bandas regulares), baseia-se na ideia de periodicidade das características das imagens obtidas pelo raio-X. O método possui duas sub-bandas, a LRB (*light regular band* - banda regular de luz) e a DRB (*dark regular band* - banda regular escura). Duas etapas compõem o método RB: estágio de treinamento e fase de teste (Figura 48).

Figura 48 - Etapas do método RB: a) estágio de treinamento; b) fase de teste.

Fonte: Li, Miao e Zhang (2011, p. 2).

Exibe-se na figura 49 um conjunto de amostras de imagens de raios-X de correia transportadora de fio de aço, com três tipos de defeitos: furo (Figura 49a), bloco fino (Figura 49e) e bordas quebradas (Figura 49d). Defeitos como os citados podem aparecer simultaneamente na imagem, como no caso da figura 49b, c e f.

A Figura 50 exibe as mesmas amostras com a região das falhas ampliadas para melhor análise.

Figura 49 - Amostras defeituosas.

Fonte: Li, Miao e Zhang (2011, p. 3).

Figura 50 - Amostras defeituosas com a região defeituosa ampliada.

Fonte: Li, Miao e Zhang (2011, p. 3 e 4).

Imagens de raios-X são utilizadas como base para a identificação de falhas em um método proposto por Wen et al. (2011). O método propõe extrair características da textura e apresentá-las a uma rede neural com arquitetura do tipo *Perceptron Multicamada* (PMC) e aprendizado supervisionado para a classificação de defeito e não defeito da correia transportadora.

Wen et al. (2011) utilizaram, como amostras, 100 imagens de raio-X de tamanho 832x600 pixels. Aplicou-se um pré-processamento à imagem e, em seguida, extraíram-se da textura as características de energia, entropia e suavidade. Segundo os autores, essa etapa gerou 240 característica de amostras.

A rede neural utilizada na classificação foi composta de 240 nós de entrada, 20 neurônios na camada oculta e 1 neurônio de saída. O valor do erro foi estipulado em 0.0002, sendo 5.000 o número máximo de treinamento, *momentum* igual a 0.95 e a taxa de aprendizado de 0.05. O neurônio de saída apresenta valor 0 para imagens defeituosas e 1 para imagem sem defeito. Do total de 100 amostras, utilizaram-se 80 para treinamento e 20 para testes. Os resultados apresentados na Tabela 3 demonstram que houve uma taxa de 100% de reconhecimento nas amostras de treinamento, enquanto que, para as amostras de testes, houve 86% de acerto.

Tabela 3 - Detecção de defeitos de imagem da correia transportadora

<i>image type</i>	<i>no defect</i>		<i>defect</i>	
<i>training set</i>	75		5	
	<i>correctly identified</i>	<i>incorrectly identified</i>	<i>correctly identified</i>	<i>incorrectly identified</i>
	75	0	5	0
<i>recognition rate</i>	100%		100%	
<i>testing set</i>	15		5	
	<i>correctly identified</i>	<i>incorrectly identified</i>	<i>correctly identified</i>	<i>incorrectly identified</i>
	13	2	4	1
<i>recognition rate</i>	86.7%		80%	
<i>the total recognition rate</i>	91.7%			

Fonte: Wen et al. (2011, p. 171).

4.2.4 Sensores fotoelétricos

Casagrande (2009) propõe a detecção de rasgos e rupturas de emendas de correia transportadora utilizando um sistema composto por sensores fotoelétricos. Na Figura 51 é apresentada a forma esquemática do conjunto em relação à correia transportadora. O detector é constituído de “N” sensores *lasers* infravermelhos montados aos pares, emissores e receptores, sobre um cavalete posicionado sob a correia. Casagrande (2009) destaca que os sensores são ligados em série, podendo ser monitorados por um PLC. Materiais que passam pelo sensor, devido à ocorrência de rasgo, são detectados, gerando um sinal ao PLC, que, por sua vez, para a correia imediatamente, evitando que o rasgo se prolongue ao longo do processo.

Figura 51 - Detector de rasgo tipo fotoelétrico: a) vista superior;
b) posicionamento do detector em relação à correia transportadora.

Fonte: Casagrande (2009, p. 1)

Com o aprimoramento do *laser*, um grande número de fabricantes tem desenvolvido sistemas com essa tecnologia com o objetivo de detectar rasgos em correias transportadoras (ASSOCIATION FOR RUBBER PRODUCTS MANUFACTURERS, 2011).

Lima (2014) utiliza um conjunto de sensores a *laser* emissor-receptor para implementar a detecção de rasgos e, adicionalmente, a função de desalinhamento e encavalamento da correia transportadora (Figura 52). Os sensores são montados sobre um cavalete com estrutura metálica quadrada em forma de U (Figura 52) e conectados a um PLC. A detecção de rasgo ocorre no sensor *laser* linear (3) com um contato elétrico normalmente fechado (NF), posicionado abaixo da correia transportadora. A interrupção do feixe do *laser* pela queda de materiais provenientes de rasgos ou que se aderiram à correia durante o transporte acionará o contato elétrico, que efetuará a parada imediata da correia transportadora.

Figura 52 - Chave detectora de rasgo em correia

Fonte: Lima (2014, p. 1).

4.3 Sistema de monitoramento por meio de câmeras

O sistema de monitoramento da superfície da correia por meio de câmeras tem sido utilizado na detecção de rasgos e outras falhas que possam ocorrer. As imagens obtidas podem ser processadas por sistemas computacionais para o reconhecimento de padrões.

4.3.1 Sistema de monitoramento por meio de câmeras

Pang (2010) apresenta um sistema de monitoramento por meio de câmeras para a análise automática das imagens (Figura 53).

O ponto crítico desse sistema se encontra no desenvolvimento do processador de imagens para a análise automática das imagens. Pang (2010) destaca que são características importantes do processador possuir um algoritmo de reconhecimento, capacidade de obter partes da figura salvas na memória do processador e altas taxas de processamento aritmético. Segundo Pang (2010), na maioria das vezes, a inspeção das imagens é feita visualmente por um operador especialista. Isso ocorre devido aos seguintes fatores:

- a) O tempo elevado para desenvolver um processador de imagens;
- b) Por haver diversos tipos de correias transportadoras, dificilmente haverá um sistema de reconhecimento de imagens que cubra todos os modelos;
- c) Imprecisão dos resultados da análise devido à baixa qualidade de imagem decorrente da sua obtenção em ambiente agressivo de operação da correia transportadora.

Figura 53 - Sistema de monitoramento por meio de câmeras

Fonte: Pang (2010, p. 13).

A revista Minérios & Minerales (2014) destaca um sistema detecção de rasgos e desalinhamentos de correias utilizando câmeras tridimensionais e sensores de

vibrações. O sistema detecta rasgos centrais e das bordas, como também o desalinhamento da correia transportadora, podendo ser configurado quanto à severidade dos mesmos para indicação de níveis de alarme. O autor cita sua utilização no Projeto Quarta Pelotização (P4P), da Samarco Mineração S/A, na Mina de Germano, em Mariana (MG).

4.3.2 Sistema de visão computacional

Utilizando visão computacional, Yang et. al. (2014) desenvolvem um sistema *on-line* para detecção de falhas em correia transportadora. Yang et. al. (2014) destacam que a utilização de visão computacional para o monitoramento de falhas em correia transportadora está em sua fase preliminar. Nesse sentido, alguns desafios devem ser superados para a plena aplicação da tecnologia. Entre esses desafios estão as condições agressivas do ambiente de trabalho das correias transportadoras, a velocidade de aquisição e processamento das imagens de alta qualidade e a confiabilidade da identificação de falhas.

O sistema é composto de quatro módulos: aquisição de imagem, transmissão de imagem, processamento de imagem e diagnóstico de falha (Figura 54). Yang et. al. (2014) destacam que diversas câmeras CCD (*Charge-Coupled Device* - Dispositivo de Carga Acoplada) podem ser posicionadas lado a lado para obter uma melhor resolução em relação à largura da correia transportadora. Outra solução proposta é a utilização de uma única câmera com lentes de campo de visão suficientemente grandes que possam assegurar uma imagem da seção inteira da correia transportadora (Figura 54 e Figura 55). Yang et. al. (2014) observam a grande quantidade de informações produzidas pelas câmeras que devem ser processadas. Com uma correia de 1,2 m, a uma velocidade de 6m/s e resolução das câmeras com 0,5 mm x 0,5 mm, haverá aproximadamente 28 MB/s, em formato bitmap, para serem processadas.

Figura 54 - Sistema de inspeção visual da correia transportadora

Fonte: Yang et. al. (2014, p. 2).

Figura 55 - Sistema de aquisição

Fonte: Yang et. al. (2014, p. 2)

A imagem adquirida passa por um pré-processamento, em que é feito um corte para obter a região de interesse, por meio da segmentação da imagem e detecção de bordas, utilizando métodos de morfologia matemática. Após o pré-processamento, obtém-se uma imagem binária, que é utilizada para a extração de características (Figura 56).

Figura 56 - Pré-processamento da imagem do rasgo: a) imagem com rasgo longitudinal; b) Imagem binarizada; c) imagem recortada; d) aspecto do rasgo na imagem binária.

Fonte: Adaptado de Yang et. al. (2014, p. 4).

Yang et. al. (2014), com base em observações das imagens, verificaram que possui-se valor 1 nas colunas referentes ao rasgo da correia.

O comprimento do rasgo é obtido pelo máximo de $g(j)$ e a largura, pela área $g(j)$. Por fim, é definido um limiar apropriado para o reconhecimento do rasgo longitudinal (Figura 57).

Figura 57 - A função do rasgo

Fonte: Adaptado de Yang et. al. (2014, p. 5).

4.3.3 Detecção on-line de falha com algoritmo SSR

Li e Miao (2016) descrevem diversos estudos de sistemas de detecção de falhas em correia transportadora utilizando visão computacional. Com enfoque nesses estudos, Li e Miao (2016) propõem um método alicerçado em algoritmo SSR (*Single Scale Retinex* - Retinex de Única Escala) para detecção *on-line* de falhas (rasgo longitudinal) em correia transportadora. Os autores citam que o algoritmo Retinex é um método fundamentado nas características biológicas da visão humana, que tem como base a teoria da constância da cor para melhorar a uniformidade do brilho da imagem. Dessa forma, o Retinex consegue eliminar a degradação da imagem adquirida devido ao ambiente com interferência do pó de carvão, iluminação desigual, o que conseqüentemente permite uma melhor extração de característica da imagem. Adicionalmente, é proposto o algoritmo MSR (*Multi-Scale Retinex* - Retinex multi-escala) em comparação ao SSR.

Exibe-se na Figura 58 o diagrama de aquisição de imagens, baseado em visão computacional, composto por uma câmera CCD e três fontes de luz.

Figura 58 - O sistema de aquisição da imagem da correia transportadora com base na visão computacional

Fonte: Adaptado de Li e Miao (2016, p. 8003).

Na Figura 59 é ilustrado as amostras de imagens da correia transportadora sem o processamento. Exibe-se na Figura 60 e Figura 61 o resultado após o processamento SSR ou MSR.

Figura 59 - Imagens de correia transportadora com falha de rasgo longitudinal:

1) amostra sem falha; 2) a 5) amostra com rasgo.

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

Fonte: Adaptado de Li e Miao (2016, p. 8003).

Figura 60 - Imagens de correia transportadora processada por SSR com parâmetro de escala de 50: 1) amostra sem falha; 2 a 5) amostra com rasgo.

Fonte: Adaptado de Li e Miao (2016, p. 8005).

Figura 61 - Imagens de correia transportadora processadas por MSR com parâmetros de escala de 10, 50 e 100: 1) amostra sem falha; 2 a 5) amostra com rasgo.

Fonte: Adaptado de Li e Miao (2016, p. 8005).

Li e Miao (2016) ressaltam a utilização do algoritmo de detecção de borda (gradiente morfológico) com o objetivo de preservar as bordas das imagens durante o processamento do método SSR. O resultado dessa combinação é demonstrado na Figura 62. Locais com tons de cinza mais escuros indicam a ocorrência de rasgo longitudinal. Em seguida, efetuou-se a segmentação da imagem para melhor extrair as características relacionadas à falha da correia transportadora (Figura 63). Rasgos longitudinais são expressos com valor “1” enquanto o fundo, com “0” (Figura 64).

Figura 62 - Método SSR com detecção de bordas

Fonte: Adaptado de Li e Miao (2016, p. 8006).

Figura 63 - Segmentação das imagens.

Fonte: Li e Miao (2016, p. 8007).

Figura 64 - Rasgo longitudinal em uma imagem binária

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Adaptado de Li e Miao (2016, p. 8007).

Li e Miao (2016), por meio de análise de uma grande quantidade de imagens da correia transportadora 1024×1024, definiram o limiar de três características para determinar se uma falha esta ocorrendo: área, *slightness* e grau de retângulo. Os limiares de cada característica são dados pelas formulas a seguir.

$$Area(g) \geq 5000 \quad (4.2)$$

$$SR(g) \geq 0.2 \quad (4.3)$$

$$Retratio(g) \geq 0.3 \quad (4.4)$$

Os valores foram definidos para atingirem 90% de taxa de precisão em teste em 1000 amostras. Os autores argumentam que, para valores de área inferior a 5000, *slightness* superior a 0,2 e grau de retângulo superior a 0,3, estão ocorrendo danos a correia transportadora, mas que há necessidade de confirmações adicionais. Na Figura 65 e na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos pelo método.

Figura 65 - Resultados da detecção de imagens da correia transportadora

Fonte: Li e Miao (2016, p. 8008).

Tabela 4 - Resultados de detecção de rasgo longitudinal

Imagem	Nº	Área	<i>Slightness</i>	Grau de retângulo	Falha
Figura 65 (1)	1-7	< 5000	> 0.2	> 0.3	Danos suspeitados
Figura 65 (2)	1	> 5000	< 0.2	> 0.3	Rasgo longitudinal
	2	< 5000	> 0.2	> 0.3	Danos suspeitados
Figura 65 (3)	1	< 5000	> 0.2	> 0.3	Danos suspeitados
	2	> 5000	< 0.2	> 0.3	Rasgo longitudinal
	3	< 5000	> 0.2	> 0.3	Danos suspeitados
Figura 65 (4)	1	> 5000	< 0.2	> 0.3	Rasgo longitudinal
Figura 65 (5)	1-3	< 5000	> 0.2	> 0.3	Danos suspeitados
	4	< 5000	> 0.2	< 0.3	Sem falhas
	5-7	< 5000	< 0.2	< 0.3	Falha <i>crack</i>

Imagem	Nº	Área	<i>Slightness</i>	Grau de retângulo	Falha
	8-11	< 5000	< 0.2	> 0.3	Sem falhas
	12	< 5000	> 0.2	> 0.3	Danos suspeitados

Fonte: Li e Miao (2016, p. 8009).

4.3.4 Sistema de detecção de rasgo com CCD de luz visível e infravermelho

QIAO et al. (2016) propõem um sistema de detecção em tempo real de rasgo em correia transportadora utilizando câmera CCD à base de luz visível e CCD à base de infravermelho. Os autores destacam que a câmera CCD de luz visível pode efetuar a detecção do rasgo longitudinal, mas, em condições de pouca luz e sendo a correia transportadora de cor preta, essa detecção pode se tornar difícil. Sendo assim, uma fonte de linha a *laser* foi utilizada para auxiliar na detecção dos rasgos. Rasgos são detectados analisando as características da linha a *laser*. A ocorrência de rasgo faz com que a linha seja quebrada. Dessa forma, a análise de detecção de canto e a detecção de linha reta determinam a presença ou não de rasgo na correia transportadora. Exibe-se na Figura 66 e Figura 67 o sistema de detecção de rasgos.

Figura 66 - Sistema de detecção CCD: a) posição de instalação do sistema de detecção; b) plataforma experimental.

Fonte: QIAO et al. (2016, p. 581).

Figura 67 – Característica da linha na detecção do rasgo longitudinal: a) rasgo longitudinal; b) detecção de canto; c) detecção de linha reta.

Fonte: Adaptado de QIAO et al. (2016, p. 578).

Segundo Qiao et al. (2016), a câmera CCD à base de infravermelho tem como objetivo detectar o aumento da radiação infravermelha e da temperatura das peças causado por rasgo presente na correia transportadora. Esses fatores fazem com que a cor da imagem se altere na presença de rasgo, passando de uma cor com maior intensidade de cinza para uma cor mais próxima do branco (Figura 68). Rasgos são identificados nesse método utilizando AHE (*Adaptive Histogram Equalisation* - Equalização Adaptativa de Histograma) (Figura 69) e pela transformada de *Hough*.

Figura 68 – Imagens processadas por transformada de Hough: a) e b) rasgo longitudinal; c) sem rasgo.

Fonte: QIAO et al. (2016, p. 579).

Figura 69 - Imagens processadas por histograma: a) e b) rasgo longitudinal; c) sem rasgo.

Fonte: Adaptado de QIAO et al. (2016, p. 580).

4.3.5 Visão de máquina na detecção on-line de rasgo longitudinal

Utilizando técnicas de visão computacional na análise de imagens em tons de cinza, Yang et al. (2016) implementam um algoritmo para a detecção *on-line* de rasgo longitudinal. Na Figura 70 é ilustrado o sistema proposto e a plataforma de testes.

Yang et al. (2016) destacam que o obstáculo na implementação do sistema de controle de falhas de correia transportadora está no tempo de processamento das imagens coletadas, que deve acontecer num período extremamente curto, devido à alta velocidade da correia, em torno de 3,15 m/s.

Figura 70 - Sistema de detecção de rasgo: a) diagrama de blocos;
b) plataforma de testes.

Fonte: YANG et al. (2016, p. 315 e 317).

Inicialmente, para aumentar a qualidade, a imagem adquirida passa por um pré-processamento e, assim, melhora a precisão na definição dos rasgos. Como resultado, tem-se uma imagem cinza, representada por uma matriz de duas dimensões. Para acelerar o processamento, um vetor unidimensional é calculado com base na matriz (Figura 71).

Figura 71 - Amostra de rasgo longitudinal: a) rasgo;
b) gráfico do vetor unidimensional.

Fonte: YANG et al. (2016, p. 315 e 317).

Yang et al. (2016) afirmam que a detecção do rasgo pode ser ocultada por ruídos ou mesmo pelo próprio fundo da imagem. Por meio de observações, os autores identificaram que o valor da região do rasgo na imagem adquirida é menor do que em outras regiões. Dessa forma, o rasgo longitudinal da correia transportadora é diagnosticado aplicando-se uma função de distância e um limiar apropriado. Os autores concluem que, apesar dos testes efetuados atestarem a validade do algoritmo, a utilização prática do método ainda deve ser verificada em pesquisas adicionais.

Utilizando visão computacional e reconhecimento de padrões, Wang e Zhang (2012) identificam o rasgo longitudinal da correia. Primeiramente, as imagens recebem um pré-tratamento para a eliminação de ruídos que podem gerar falsa detecção de rasgos, como manchas e abrasão da correia transportadora. Ao final do processo, tem-se uma imagem segmentada com poucas interferências (Figura 72).

Figura 72 - Pré-processamento da imagem: a) imagem original; b) imagem segmentada com ruídos referentes à abrasão da correia; c) imagem com poucas interferências.

Fonte: Adaptado de Wang e Zhang (2012, p.623).

Wang e Zhang (2012) utilizam, como reconhecimento de padrões, as características geométricas do rasgo longitudinal: comprimento e as duas bordas bastantes simétricas. O monitoramento foi feito a 40 cm da correia e a uma velocidade de cerca de 6 m/s. Os testes demonstraram a eficiência no reconhecimento dentro de valores de tempo da ordem de 160 ms.

De acordo com Peng (2013), reduzir a taxa de falsos positivos na detecção de falhas em monitoramento de correia transportadora é um dos grandes desafios a serem superados em sistemas utilizando visão computacional. Peng (2013) argumenta que a causa da alta taxa de falsos positivos está no fato da limitação de alguns métodos que detectam rasgos através da localização de longas bordas em imagens da correia transportadora. Algumas dessas bordas são causadas por manchas de carvão (Figura 73).

Figura 73 - Imagens da correia transportadora: a) com rasgo; b) manchas de carvão.

Fonte: Peng (2013, p. 1).

Sendo assim, o autor propõe um método para reduzir as taxas de falsos positivos, combinando visão computacional a um classificador AdaBoost.

O método é composto por duas partes principais: detecção de padrões de rasgos e classificação do rasgo em real e falso. Detecção de rasgo consiste em localizar estruturas semelhantes a bordas em imagens em escala de cinza da correia transportadora. Para tanto, são utilizadas janelas lineares de 13 pixels em quatro direções (0° , 45° , 90° e 135°), conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74 - Janelas lineares

Fonte: Peng (2013, p. 2).

A classificação do rasgo é obtida por meio de um vetor de características apresentado a um classificador AdaBoost. O vetor de características é obtido da análise das bordas, extraindo padrões de disco e seu devido posicionamento (Figura 75).

Figura 75 - Extração de padrão de disco e correção de pose

Fonte: Peng (2013, p. 3).

Devido à escolha de 31 pixels para o padrão do disco adotado, o vetor de características atingiu o comprimento de 709 posições. Obteve-se uma redução da dimensão para 466 posições utilizando PCA (*Principal Component Analysis* - Análise de Componentes Principais).

Foi utilizado um conjunto de 4418 vetores de características como treinamento de classificador AdaBoost. Desse total, 960 vetores são referentes a rasgos reais e 3458 a rasgos falsos, tendo como resultado a detecção de 107 rasgos falsos, sendo que 8 foram classificados como rasgos reais, alcançando, assim, uma taxa de alarme falso de 7,61%.

O método foi implementado utilizando Microsoft Visual Studio 2008, um laptop Dell com um processador Core i-2450 de 2,5 GHz e 4 GB memória.

Conveyor Belt Guide (2017) descreve um sistema a laser para detectar a ocorrência de rasgo na esteira (Figura 76). A faixa de *laser* é aplicada à correia transportadora e capturada por uma câmera. Através de triangulação, o *laser* é analisado e são determinadas a largura e profundidade da área de cobertura. Os resultados permitem a geração de uma imagem 3D, que determina se ocorreu um rasgo e, em caso afirmativo, desliga-se automaticamente a correia transportadora.

Figura 76 - Sistema a *laser* de detecção de rasgo

Fonte: Conveyor Belt Guide (2017)

4.4 Conclusão

Neste capítulo, foram abordados diversos sistemas de monitoramento e controle de falhas em correia transportadora, utilizando diversas abordagens mecânicas, elétricas e visão computacional.

Observou-se que alguns autores, em especial os de visão computacional, não descrevem totalmente as informações sobre as condições sob as quais os estudos foram realizados. Entre essas informações destacam-se: a velocidade com a qual a esteira foi submetida durante a coleta de dados, desempenho do protótipo, efeitos na aquisição de imagem em ambientes industriais severos, principalmente em relação à poeira.

O capítulo a seguir apresenta os principais conceitos e passos adotados no desenvolvimento do método do presente trabalho, como também a estrutura física, em escala laboratorial, para simular uma correia transportadora real para validar o protótipo de detecção de falhas.

CAPÍTULO 5

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, apresenta-se a descrição detalhada dos materiais utilizados e os procedimentos realizados no desenvolvimento da metodologia.

A proposta foi desenvolvida de forma iterativa e incremental, dividida em duas fases de investigação laboratorial:

a) Validação: fase de averiguação das principais ideias envolvidas na metodologia;

b) Aprimoramento: fase de aprimoramento e melhoria da fase de validação;

Tanto na fase de validação quanto na de aprimoramento a proposta é composta de dois momentos:

a) Aquisição, pré-processamento, segmentação da imagem e geração de banco de imagens, efetuada por meio de um sistema desenvolvido para essa finalidade;

b) Extração, classificação das amostras com rede neural e SVM, por meio do Matlab.

O diagrama de blocos exibido na Figura 77 ilustra todos os procedimentos computacionais envolvidos na proposta: aquisição de imagem, pré-processamento, segmentação e classificação.

Figura 77 - Diagrama de blocos da proposta do presente trabalho

Fonte: autor (2019).

Conforme exibido na Figura 77, a etapa de desenvolvimento, testes e simulações foi realizada utilizando duas plataformas: Microsoft Visual Studio 2017 - VB.NET e Matlab 2017. Para a plataforma do Microsoft Visual Studio, foi também utilizada a biblioteca AForge, agilizando, assim, o tratamento das imagens.

O sistema desenvolvido em VB.NET efetua a geração do banco de imagens, que será analisado, posteriormente, no Matlab.

Pretende-se futuramente que a etapa do Matlab seja incorporada ao sistema VB.NET para o monitoramento em tempo real, assim, sinalizando e efetuando a visualização de ocorrência desses tipos de falhas. Dessa forma, será possível fornecer elementos para que o pessoal de supervisão tome a decisão de efetuar a parada da correia ou mesmo de configurar o sistema para efetuar a parada automaticamente em caso de diagnóstico de falha.

5.1 Estrutura física

Levando em consideração as restrições operacionais e econômicas para efetuar ensaios práticos em ambiente industrial, desenvolveu-se uma estrutura física para simular um transportador de correia para validar o protótipo de detecção de falhas. Exibe-se na Figura 78 o diagrama da estrutura composta pela correia transportadora, *webcam*, laser e iluminação.

Figura 78 - Diagrama da estrutura

Fonte: autor (2019).

A estrutura montada pode ser observada parcialmente na Figura 79. Com o intuito de destacar os elementos principais do protótipo (*webcam* e *laser*), optou-se por omitir, dessa visualização, a iluminação posicionada acima dos mesmos.

Figura 79 - Estrutura montada

Fonte: autor (2019).

Embora a estrutura, em ambiente laboratorial, esteja obtendo as imagens da superfície superior da correia transportadora. Uma vez entrando em operação no ambiente industrial, os equipamentos serão instalados de forma a obter as imagens da superfície inferior da correia, conforme exibido na Figura 80.

Figura 80 - Montagem final

Fonte: autor (2019).

5.1.1 Correia transportadora

A estrutura foi implementada utilizando uma esteira com uma correia de 330 mm de largura e motor de 1 HP CC, com variação da velocidade.

5.1.2 Suporte para os modelos de falhas

Visando a utilizar vários modelos para a simulação de falhas, foi adaptado um suporte sobre a correia, possibilitando a inserção e remoção dos modelos durante a fase de aquisição de imagens para a criação do banco de imagens.

5.1.2.1 Fase de validação

O suporte inicial foi composto apenas por uma faixa de velcro adaptada diretamente sobre a correia transportadora, sendo que os elementos representando as falhas eram inseridos sobre a mesma (Figura 81).

Figura 81 - Suporte para simulação de falhas

Fonte: autor (2019).

5.1.2.2 Fase de aprimoramento

Nessa fase, foram simulados três modelos de falhas, descritos adiante neste capítulo, que necessitaram de uma faixa de velcro a mais para serem acoplados.

Inicialmente, os velcros eram adaptados diretamente na correia transportadora. Essa abordagem acarretou intensas deformações dos modelos ao passarem pelos roletes de tração (Figura 82).

Figura 82 - Deformação do modelo

Fonte: autor (2019).

Diversas tentativas foram empregadas para solucionar o problema, todas sem sucesso, como a utilização de um EVA mais rígido, fixação por apenas um lado, inserção do modelo na posição acima da área de tração da correia transportadora, entre outros.

A solução encontrada foi criar um suporte constituído de duas partes simétricas (Figura 83). Cada parte foi elaborada com uma faixa de velcro presa a três tensores (elásticos). A utilização dos tensores evitou as deformações causadas nos modelos, permitindo, assim, uma aquisição de imagem sem problemas estruturais.

Figura 83 - Suporte de modelos

Fonte: autor (2019).

5.1.3 Laser

A projeção em linha sobre a correia foi obtida por meio de um *laser*, com emissão na cor verde e com ajuste de foco. Na Figura 84 é exibido o *laser* montado sobre uma base reguladora de posição.

Figura 84 - Plataforma *laser*

Fonte: autor (2019).

Observou-se um aumento da temperatura do *laser* mediante seu uso prolongado. O aumento da temperatura acima dos 30°C degradou paulatinamente a linha do *laser*, até que a mesma desapareceu por completo. Dessa forma, foi necessário adicionar um ventilador para efetuar o resfriamento do mesmo.

O *laser* foi adaptado internamente a um tubo quadrado de alumínio, nas dimensões de 32x32x85 mm. A transformação do ponto do *laser* em linha é feita utilizando um tubo de vidro de 6 mm de diâmetro, posicionado na frente do feixe do *laser*.

5.1.3.1 Fase de Validação

Os ensaios dessa fase foram efetuados com uma linha do *laser* focalizada obtendo-se uma linha com menor largura.

5.1.3.2 Fase de Aprimoramento

Após vários ensaios, optou-se por uma regulagem de foco na condição de maior desfoque do ponto do laser, obtendo, assim, uma linha com maior largura. Essa opção proporcionou uma melhor definição na distinção de falhas. A regulagem de foco é efetuada na parte frontal do laser, conforme demonstrado na Figura 85 (a e b).

Figura 85 – Configuração do laser: a) focado; b) desfocado.

Fonte: autor (2019).

5.1.4 Webcam

5.1.4.1 Fase de Validação

Inicialmente, utilizou-se, na aquisição das imagens, uma *webcam*, modelo C270, do fabricante Logitech, conectada a uma porta USB 2.0, gerando imagens com resolução de 1280x720 pixels a 30 fps (Frames Per Second – Quadros Por Segundo).

Os ensaios com a C270 foram efetuados apenas com o modelo de rasgo exibido na Figura 87, obtendo-se resultados promissores (descritos no capítulo de resultados) tanto em relação ao processamento das imagens pelo software de aquisição, quanto pelos algoritmos de classificação. Estando essa fase consolidada, optou-se por adotar uma *webcam* com maior resolução e ensaios em novos modelos de falhas

5.1.4.2 Fase de Aprimoramento

A *webcam* adotada nessa fase foi uma *webcam* modelo C920, do fabricante Logitech, conectada a uma porta USB 3.0, gerando imagens com resolução de 1920x1080 pixels a 30 fps (Frames Per Second – Quadros Por Segundo). Tanto a *webcam* C270, como a C920 foram posicionadas de forma a enquadrar a largura da correia e visualizar a projeção do *laser* num ângulo de 45°. O cálculo da distância entre a *webcam* e o *laser* será descrito adiante.

Observou-se, na aquisição de imagens utilizando o modelo C920, uma degradação intermitente na taxa de quadros por segundo (fps). A taxa oscilava entre 30 fps a 15 ps. Testes demonstraram que os controles de ajustes de parâmetros do *software* da *webcam*, operando em modo automático, geravam as oscilações observadas. Houve uma ligeira melhora na estabilidade de aquisição ao se operar em modo manual. A solução definitiva encontrada foi a desinstalação do *software* de controle da *webcam*, utilizando apenas a instalação padrão do Windows e efetuando os ajustes de parâmetros por meio de funções disponíveis na biblioteca de visão computacional disponível no AForge. Assim, obteve-se uma estabilidade do sistema operando nos 30 fps.

5.1.5 Caixas de Proteção

Tanto a *webcam* quanto o *laser*, futuramente, serão acoplados em caixas de proteção IP67 (*International Protection* – Proteção Internacional) com limpador, ventilador e aquecedor (Figura 86). A utilização das caixas proverá uma maior proteção dos equipamentos frente a um ambiente industrial agressivo principalmente em relação a poeira.

Figura 86 - Caixa de proteção IP67

Fonte: EagleVision Tecnologias em Segurança (2019).

5.1.6 Computador

O computador utilizado nos testes e simulações possui um processador de 3.4GHz, Intel Core i7-3770 com 8 GB de memória e sistema operacional Windows 10.

5.1.7 Simulação de rasgos

5.1.7.1 Fase de Validação

Com base em danos à correia transportadora, como, por exemplo, os exibidos na Figura 32, foi preparado um ambiente de teste para simular as características do tipo “rasgo interno”.

Rasgos internos foram simulados adaptando-se elementos, cortes de EVA (*Ethil Vinil Acetat* - Etileno Acetato de Vinila), sobre a correia, por meio de velcros com características aproximadas da cor e textura da própria correia. Foram utilizados dois conjuntos de elementos com dimensões diferenciando-se na largura. O primeiro conjunto tinha 5 mm largura, 20 mm de comprimento e 4 mm de altura. Já o segundo, 10 mm de largura, 20 mm de comprimento e 4 mm de altura.

Os materiais foram posicionados empiricamente em diferentes tamanhos, com ângulos de 0°, 45°, 90°, 180°, assim como pequenas variações dos mesmos. Na Figura 87 é exibido a distribuição dos materiais e a incidência da projeção do *laser* sobre os mesmos. Devido ao ambiente agressivo de operação da correia transportadora, pretende-se adotar, futuramente, um mecanismo de precaução, caso haja a interrupção do *laser*. Caso a interrupção ocorra durante um período de tempo, a ser configurado, um alerta será acionado.

Figura 87 - Simulação de rasgos internos

Fonte: autor (2019).

5.1.7.2 Fase de Aprimoramento

Tendo obtido resultados que validaram a eficiência do método, foram elaborados novos modelos, mais próximos das falhas estudadas: rasgos, cortes e perfurações. Exibe-se na Figura 88 os modelos e as medidas adotadas para cada um deles. Ensaios preliminares foram efetuados no sentido de obter as menores dimensões para rasgos, cortes e perfurações, chegando às dimensões atuais.

Cada modelo foi elaborado em EVA, com velcro de 330 mm fixado nas bordas, para conectar-se ao suporte de modelo adaptado à correia. As dimensões dos rasgos, cortes e perfurações foram definidas levando em consideração qual seria o pior caso para detecção da metodologia apresentada (Figura 88).

Figura 88 – Modelos: a) Rasgos em vista superior; b) Rasgos em vista lateral; c) Cortes em vista superior; d) Perfurações em vista superior.

c)

d)

Fonte: autor (2019).

Na Figura 89 são exibidos as imagens dos modelos reais utilizados na aquisição de imagens e geração do banco de imagens utilizadas no presente trabalho.

Figura 89 – Modelos de falhas

a)

b)

c)

Fonte: autor (2019).

5.2 Aquisição de imagem

Alguns desafios tiveram que ser superados nessa fase, como distorções das imagens devido ao movimento da correia, cálculo da distância entre a *webcam* e o *laser*, velocidade de processamento das imagens, entre outros. As abordagens adotadas na solução de cada um desses itens são descritas a seguir.

5.2.1 Imagem em movimento

Imagens em movimento tendem a gerar distorções, entre elas, o tipo borrão (*motion blurs*). A distorção ocorre devido à diferença de velocidade do obturador da câmera, que é inferior à velocidade do objeto em cena (PENG et al., 2010). Problemas dessa natureza têm sido estudados a fim de obter soluções de restauração e reconstrução de imagens digitais no processamento de imagens (DENG et al., 2015; QIAO et al., 2013; DENG et al., 2012). O efeito borrão é simulado na Figura 90b.

Figura 90 – Cameraman: a) em repouso; b) em movimento, degradado por um motion blur com lente 20, teta 45 e o ruído com BSNR = 30db.

Fonte: Deng et al. (2015, p. 13).

Distorções dos tipos citados anteriormente, em especial o efeito borrão (*motion blurs*), ocorreram nas imagens adquiridas no sistema devido à velocidade de movimento da correia transportadora (Figura 91b). Esse efeito dificultou a extração de características para a identificação de rasgos na correia.

Figura 91 - Imagem adquirida da correia: a) em repouso; b) em movimento.

Fonte: autor (2019).

5.2.2 Exposição

5.2.2.1 Fase de Aprimoramento

Nos testes de aquisição de imagens, utilizando os modelos de cortes e perfurações com a *webcam* C920, observou-se um problema que não foi determinante nos ensaios utilizando apenas modelos de rasgos, mas que dificultou o tratamento e a classificação das novas amostras das imagens.

A captura dos modelos mostrou imagens em que a linha do laser estava presente mesmo havendo uma perfuração ou corte. Na Figura 92 é exibido o efeito mencionado, tanto na imagem original, quanto na imagem com detecção de bordas.

Figura 92 - Efeito da exposição: a) imagem adquirida;
b) imagem ROI (Region Of Interest – Região de Interesse) com detecção de borda.

a)

b)

Fonte: autor (2019).

Após diversas tentativas de solucionar o problema utilizando ajustes da *webcam*, aquisição de imagens com e sem luz ambiente, procedimentos de *software*,

entre outros, optou-se por uma abordagem utilizando o ajuste de exposição da *webcam* e uma fonte de luz adicional à estrutura de aquisição.

O controle de ajuste de exposição da *webcam* permite a entrada de mais ou menos luz para a aquisição das imagens. Diminuído ao máximo o valor de exposição, foi possível uma redução acentuada do efeito mencionado. Em contrapartida, as imagens ficaram totalmente escuras. A solução encontrada para diminuir ao máximo a exposição e obter imagens mais claras, foi adicionar um refletor de LED de 10W na estrutura da correia transportadora para iluminar a área de aquisição de imagens (Figura 93).

Figura 93 - Refletor Led 10W

Fonte: autor (2019).

Os ensaios mostraram uma relação estreita entre o ajuste de exposição em relação à taxa de quadros por segundo. A faixa de variação do sistema para o controle de exposição está entre 0 e -8. Ensaios mostraram que configurações utilizando valores entre 0 e 3 (imagens mais claras) obtêm uma variação em torno de 7 a 15 fps. Para valores de 3 e 4, o fps aumenta para em torno de 25 e, para exposições acima de 4, tem-se 30 fps.

5.2.3 Princípio de escaneamento 3D a laser

Visando a minimizar a influência do borrão mencionado anteriormente, adotou-se o escaneamento 3D a *laser*. Essa abordagem auxilia na tarefa de processamento de imagens, em especial na tarefa de extração de características para o diagnóstico de falhas na correia.

O princípio de escaneamento 3D a *laser* é amplamente difundido na indústria para a aquisição de dados 3D por meio de imagens 2D adquiridas por uma câmera de vídeo e uma luz estruturada (SAAR, 2008). Uma linha reta, gerada por um *laser*, é projetada em um determinado ângulo sobre a superfície de um objeto. Por meio da deformação da projeção dessa linha, é possível obter a altura e a largura do objeto (Figura 94) (HORNEBER, 2006).

Essa técnica permitiu extrair características que resultam numa melhor distinção entre falhas reais e rasgos. Futuramente, essa técnica será utilizada para detectar emendas da correia pela elevação da linha projetada, ou perfurações e cortes em casos de depressão.

Figura 94 - Princípio do método “luz estruturada”: a) desenho esquemático; b) aplicação do método para a medição da altura de blocos empilhados.

Fonte: Horneber (2006, p. 168).

Outra vantagem é ser robusta a presença de manchas na correia. Segundo Peng (2013), manchas de carvão ou abrasões podem gerar uma falsa identificação de rasgo da correia em métodos baseados em processamento de imagens para a detecção de bordas ou morfologia.

A Figura 95 ilustra o diagrama da estrutura montada conforme o princípio apresentado, sendo composto por uma correia, uma *webcam* e um *laser* com projeção em linha.

Figura 95 - Protótipo para a aquisição de imagens

Fonte: autor (2019).

5.2.4 Procedimentos para posicionamento da webcam

A distância entre a *webcam* e a linha do *laser* é calculada com base nas características da lente esférica utilizada em câmeras de vídeo. Devido à ausência de informação sobre os valores envolvidos na relação da lente utilizada na *webcam*, foi efetuado um conjunto de ensaios para o levantamento desses valores. Pretende-se, dessa forma, contribuir com um método que possa ser utilizado caso seja empregado outro modelo de *webcam*. O objetivo final é encontrar o valor da variável D_i , utilizada, na fórmula, para calcular a distância entre a *webcam* e a linha do *laser*.

Segundo Luz e Álvares (2006), raios luminosos paralelamente incidentes sobre uma lente esférica são convergidos para o seu eixo em um ponto determinado (Figura 96).

Figura 96 - Equação das lentes

Fonte: Adaptado de Luz e Álvares (2006, p. 263).

A equação das lentes define que uma imagem AB posicionada a uma distância D_o de uma lente esférica formará uma imagem de tamanho A'B' a uma distância D_i .

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D_i}{D_o} \quad (5.1)$$

Levando em consideração a equação 5.1 e as diferenças de resolução das *webcams*, foram criados dois cartões de calibragem (Figura 97), com três retângulos desenhados internamente, representando a imagem AB, com as seguintes dimensões:

- a) C270: 40 x 20 mm, 100 x 50 mm e 160 x 90 mm.
- b) C920: 60 x 40 mm, 160 x 100 mm e 240 x 160 mm.

Figura 97 - Cartão da calibragem: a) C270; b) C920

Fonte: autor (2019).

Colheram-se imagens do cartão em sete distâncias diferentes: 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm, 700 mm e 800 mm. Em seguida, as imagens foram trabalhadas no *Photoshop*, no qual se desenharam retângulos, representando a imagem A'B', sobre os retângulos AB existentes no cartão. Os valores, em pixels, dos retângulos representando a imagem A'B' são ilustrados em vermelho na Figura 98 para uma imagem obtida a 200 mm de distância da *webcam*.

Figura 98 - Cartão da calibragem com distância de 200 mm: a) C270; b) C920

Fonte: autor (2017).

As Tabelas 5 e 6 exibem os valores obtidos referentes aos parâmetros envolvidos na relação da lente da *webcam*.

Tabela 5 – C270: Valores da relação entre os parâmetros da lente da *webcam*

AB (mm)	D _o (mm)	A'B' (px)	D _i
20	200	139	1390,0
50	200	344	1376,0
90	200	618	1373,3
20	300	95	1425,0
50	300	232	1392,0
90	300	417	1390,0
20	400	72	1440,0
50	400	176	1408,0
90	400	316	1404,4
20	500	58	1450,0
50	500	140	1400,0
90	500	252	1400,0
20	600	48	1440,0
50	600	119	1428,0
90	600	214	1426,7
20	700	42	1470,0
50	700	102	1428,0
90	700	182	1415,6
20	800	37	1480,0
50	800	90	1440,0
90	800	162	1440,0
Média:			1420,0

Fonte: autor (2019).

Tabela 6 - C920: Valores da relação entre os parâmetros da lente da *webcam*

AB (mm)	D _o (mm)	A'B' (px)	D _i
40	200	242	1210
100	200	614	1228
160	200	984	1230
40	300	170	1275
100	300	426	1278
160	300	684	1283
40	400	132	1320
100	400	328	1312
160	400	524	1310
40	500	108	1350
100	500	268	1340
160	500	428	1338
40	600	92	1380
100	600	228	1368
160	600	362	1358
40	700	80	1400
100	700	196	1372
160	700	314	1374
40	800	70	1400
100	800	172	1376
160	800	276	1380
Média:			1328

Fonte: autor (2019).

Aplicando-se a Equação 5.1, tem-se o D_i de cada relação individual. Observam-se pequenas distorções dos valores de D_i, causadas pelo processo manual no posicionamento do cartão a cada nova tomada de imagem. Sendo assim, efetuou-se o cálculo da média para D_i.

Tendo o valor de D_i igual a 1420, aplicou-se a Equação 5.1 com os valores de largura da correia iguais a 330 mm para as resoluções de imagem das *webcams* C270 e C970. Os resultados são exibidos, respectivamente, na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores dos elementos para cálculo da distância entre a câmera e o *laser*.

Modelo Webcam	AB (mm)	A'B' (px)	D_i	D_o (mm)
	Largura da correia	Resolução da câmera		Distância entre a câmera e o <i>laser</i>
C270	330	1280	1420	370
C920	330	1920	1328	228

Fonte: autor (2019).

Por fim, utilizando relações trigonométricas, obteve-se 260 mm para o comprimento e altura da *webcam* em relação ao posicionamento da linha do *laser* (Figura 99).

Figura 99 - Posicionamento da *webcam* e relação à linha do *laser*:

a) C270; b) C920

a)

b)

Fonte: autor (2019).

5.2.4.1 Fase de Validação

A tela de visualização para o alinhamento da *webcam* C270 pode ser vista na Figura 100. Nessa fase, foi adotado um ajuste de posicionamento de forma a visualizar toda a correia transportadora sem levar em conta algum trabalho futuro em relação ao desalinhamento da correia.

Figura 100 - Tela de visualização de posicionamento da correia transportadora

Fonte: autor (2019).

5.2.4.2 Fase de Aprimoramento

Tendo em vista a C920 e preparando a metodologia para trabalhos futuros, como, por exemplo, a detecção de desalinhamento da correia transportadora, optou-se por ajustar a *webcam* de forma que a correia não ocupasse toda a imagem adquirida. Dessa forma, a posição final da C920 para o comprimento e altura da *webcam* em relação ao posicionamento da linha do *laser* ficou, respectivamente: 182 mm, 182 mm (Figura 101).

Figura 101 - Posicionamento final da *webcam* C920

Fonte: autor (2019).

A Figura 102 exibe a tela de visualização para o alinhamento da *webcam* C920. A tela é composta por duas linhas divisórias em vermelho, sendo que a linha horizontal será onde a linha do *laser* deve passar. Pequenas marcações verticais em vermelho, nas extremidades da linha horizontal, serão utilizadas, futuramente, para controle do desalinhamento da correia transportadora. Linhas em cor laranja representam a área de interesse, que é detalhada mais adiante. Linhas em azul servem como guias no posicionamento da câmera.

Sobre a correia transportadora, foi colocado um modelo para auxiliar na verificação do posicionamento da câmera e também para o ajuste de foco do sistema.

Figura 102 - Tela de visualização de posicionamento da correia transportadora

Fonte: autor (2019).

5.2.5 Configuração de aquisição de imagem

5.2.5.1 Fase de Validação

A Figura 103 exibe a principal tela homem-máquina do protótipo. Na parte superior, tem-se a janela de exibição das imagens, com as dimensões definidas como ROI adquiridas em tempo real. A definição dessa região é descrita adiante.

A imagem exibida pode ser alterada para facilitar as etapas de configuração do sistema. As opções de exibição são efetuadas no componente *View*, sendo: *Contrast*, *Brightness*, *Gaussian*, *Color*, *Edge Detector*.

Na parte central, têm-se os controles para ajustes de contraste, brilho e filtro Gaussiano, para uma melhor definição de imagem. O controle Color HSV permite filtrar a cor da linha do *laser* para efetuar a segmentação. O botão *Save* salva alguma imagem, caso seja necessário.

O botão *Acknowledgement* permitirá, em versões futuras, efetuar o reconhecimento de alarme acionado pelo sistema na detecção de falha. A imagem

contendo a falha da correia é exibida na janela inferior direita. A janela à esquerda exibe a imagem capturada pela *webcam* em tempo real.

A captura das imagens que formaram o banco dessa fase foi feita via configuração interna do *software*. Na próxima fase, descrita adiante, foram adicionados controles para essa tarefa.

Figura 103 - Interface homem-máquina do protótipo

Fonte: autor (2019).

5.2.5.2 Fase de Aprimoramento

A tela principal do sistema, utilizada nessa fase, pode ser vista na Figura 104. Tem-se uma visualização com a opção *view* selecionada em *Crop*, que exibe a área de interesse sem tratamento de imagem, e a opção em *Edge Detector*, que exibe a área de interesse após o tratamento de detecção de borda.

O botão *Acknowledgement* foi omitido temporariamente, para que seja melhor avaliado na fase de maturidade. Ensaio direcionados ao filtro Gaussiano demonstraram que os efeitos sobre o resultado final da imagem não eram significativos a ponto de justificar o seu uso e, portanto, ele foi removido do protótipo.

Como mencionado anteriormente, o *software* de controle de parâmetros da *webcam* não foi instalado devido à instabilidade no sistema. Ele foi substituído por funções do *Aforge*, cujos controles podem ser vistos na área *Configuration: Zoom, Focus, Exposure*.

As áreas "*Capture by Time* e *Capture* servem para capturar as imagens que formaram o banco de imagens descrito a seguir. *Capture by time* permite capturar as imagens durante um período de tempo informado pelo usuário enquanto que a função *capture* permite que o início e fim da captura sejam feitos manualmente.

Figura 104 - Interface homem-máquina do protótipo da fase de aprimoramento: a) Crop: imagem original; b) Crop: imagem com detecção de borda.

a)

b)

Fonte: autor (2017).

5.3 Pré-processamento

A seguir, são descritas as técnicas e métodos utilizados nessa fase de tratamento das imagens.

5.3.1 Região de interesse

5.3.1.1 Fase de Validação

A imagem adquirida possui uma alta resolução (1280x720 pixels), o que favorece a precisão do diagnóstico de falhas. A Figura 105 ilustra a ROI destacada por duas linhas horizontais na cor verde. A ROI foi fixada em 90 pixels, devido à janela deslizante, descrita adiante. Horizontalmente, a ROI pode ser ajustada conforme a necessidade da aplicação.

Figura 105 – Imagem adquirida

Fonte: autor (2017).

A extração da ROI considera dois aspectos: linha do *laser* e janela deslizante.

a) Linha do *laser*: a linha é definida como a localização horizontal em que há maior incidência de pixels com a luz do *laser* (Figura 106)

b) Janela deslizante: em cima da imagem adquirida da linha do *laser*, será posicionada uma janela deslizante lógica, definida por 90x9 pixels, visando à extração do vetor descritor, que, posteriormente, será utilizado na classificação (RNA e SVM) (Figura 106). Analisando as deformações da projeção da linha do *laser* e a curvatura nas bordas da correia transportadora, adotou-se um posicionamento para a janela deslizante, com 27 pixels abaixo da linha central do *laser* e 63 pixels acima.

Figura 106 – Janela deslizante – diagrama

Fonte: autor (2017).

Para cada imagem adquirida (1280x720 pixels), ao ser percorrida com a janela deslizante (90x9 pixels), é possível gerar, então, 142 amostras para classificação, restando ainda 2 pixels, que foram descartados, ou seja, dos 1280 pixels horizontais disponíveis, foram utilizados 1278 pixels.

A Figura 107a exibe a projeção do *laser* em condições normais de operação da correia, ou seja, sem falhas, e a Figura 107b exibe a mesma projeção, com a presença de falhas.

Figura 107 - Exemplo da ROI com a projeção do *laser*: a) sem falha; b) com falha.

(a)

(b)

Fonte: autor (2019).

c) Contraste e brilho: por meio de observações, efetuaram-se ajustes de contraste e brilho, com o objetivo de obter uma maior definição da área da linha do *laser*, e, assim, possibilitar uma melhor extração de características.

d) Ruído: ruídos gerados pela câmera e provenientes do ambiente foram minimizados pela aplicação de um filtro Gaussiano, com janela de 3x3 pixels.

5.3.1.2 Fase de Aprimoramento

Optando-se pela *webcam* C920, a imagem adquirida passou para as dimensões de 1920x1080 pixels. Com base nos ensaios preliminares, nessas dimensões, e levando em consideração os novos modelos de falhas, a ROI foi alterada para 150 pixels de altura, como pode ser vista na Figura 108, destacada por linhas tracejadas em cor laranja. Detalhes que motivaram a alteração da janela deslizante de 90 para 150 pixels de altura são apresentados na seção banco de imagens.

Figura 108 - Imagem adquirida

Fonte: autor (2019).

A janela deslizante utilizada na extração do vetor descritor passou de 90x9 pixels para 150x18 pixels. Levando-se em consideração a quantidade de 1920 pixels horizontais da ROI e 18 pixels horizontais da janela deslizante, têm-se um total de 106 amostras, descartando 6 pixels de cada lado. Do total, foram utilizadas 98 amostras para classificação e 8, sendo 4 de cada extremidade, serão usadas futuramente, para controle do desalinhamento da correia transportadora.

5.3.2 Conversão RGB para HSV

O passo seguinte incluiu a conversão do formato RGB (*Red, Green, Blue* – Vermelho, Verde, Azul) original da imagem adquirida, para o formato HSV (*Hue Saturation Value* – Matiz Saturação Valor) para efetuar a segmentação em apenas uma dimensão (Hue) (AZEVEDO; CONCI, 2003).

Em testes preliminares utilizando-se o formato RGB, observou-se forte influência da luminosidade sobre o protótipo em relação à etapa de filtragem da cor da linha do *laser* para efetuar a segmentação. De acordo com a intensidade da iluminação, havia a necessidade de reajustar os valores do filtro. A influência da iluminação diminuiu drasticamente com a adoção do formato HSV.

5.4 Segmentação

O objetivo da segmentação é a extração ou identificação da região com conteúdo relevante para a aplicação (BAGGIO et al., 2012).

Durante o processo de conversão de RGB para HSV, realizou-se a binarização da imagem. Para tanto, o *threshold* foi escolhido de forma a abranger as variações de cores, no caso, o verde e suas variações, emitidas pela luz do *laser* dentro do espaço de cor HSV. Assim, configurou-se uma faixa de 60 a 180 para o *threshold*. Dessa forma, os pixels pertencentes à faixa de *threshold* recebem o valor 255 (cor branca), e os que não pertencem, o valor 0 (cor preta). A Figura 109 exibe o resultado da segmentação para a imagem sem e com falhas.

Figura 109 - Imagem binarizada: a) sem falha; b) com falha.

Fonte: autor (2019).

A detecção de bordas utiliza o método de Canny e tem como objetivo reduzir a quantidade de dados da imagem. A Figura 110 exibe o resultado da detecção de bordas para uma imagem sem e com falhas.

Figura 110 - Imagem com detecção de bordas: a) sem falha; b) com falha.

Fonte: autor (2019).

Analisando as imagens após a detecção de bordas, identificou-se que, para a imagem sem falhas, Figura 110a, as bordas são basicamente linhas contínuas. Em contrapartida, a imagem com falhas, Figura 110b e Figura 111, apresenta formações geométricas não lineares.

Ressalta-se que as variações geométricas estão relacionadas com o tamanho e o ângulo do material, que simula rasgos, e a velocidade da correia.

Figura 111 - Imagem com detecção de bordas: corte e zoom

Fonte: autor (2019).

5.5 Banco de imagens

5.5.1 Fase de Validação

Estando o sistema operando com todos os procedimentos descritos anteriormente, foram feitas coletas de imagens com o intuito de criar um banco a ser utilizado nas etapas seguintes do processo.

Para tanto, foram coletadas imagens com a correia em operação configurada em 7 velocidades diferentes: variação de 1 km/h a 7 km/h, com intervalos de 1 km/h.

A cada configuração de velocidade, as imagens foram captadas, processadas e armazenadas separadamente em três grupos: imagem adquirida, imagem binarizada e imagem com detecção de bordas (Figura 112).

Figura 112 – Banco de Imagens – Imagens adquiridas:
 01-ImgColor = imagem adquirida; 02-ImgBinary = imagem binarizada;
 03-ImgEdge = imagem com detecção de bordas.

Fonte: autor (2019).

Com base no banco de imagens, foram selecionadas imagens com detecção de bordas, com e sem falhas, das 7 configurações de velocidades. A seleção foi feita de forma manual e visual, a partir da análise de similaridade entre as imagens. Uma vez selecionadas, as imagens foram recortadas no padrão 90x9 pixels (dimensão da janela deslizante) no *software Adobe Fireworks* (Figura 113). Os recortes foram posicionados de forma a minimizar o número de imagens semelhantes. O resultado foram dois conjuntos de 960 imagens cada, sendo um com rasgo e outro sem rasgo (Figura 114 e Figura 115).

Figura 113 - Recorte de imagens - Tela Adobe Fireworks

Fonte: autor (2019).

Figura 114 - Imagens recortadas - Conjunto sem rasgo

Fonte: autor (2019).

Figura 115 - Imagens recortadas - Conjunto com rasgo

Fonte: autor (2019).

5.5.2 Fase de Aprimoramento

Com base nos modelos descritos nas Figura 88 e Figura 89, foi efetuada a coleta de imagens com a correia em operação nas velocidades de 2 km/h, 4 km/h e 6 km/h.

Durante o processo de coleta, observou-se que a taxa de quadros por segundo teve uma ligeira queda, passando de 30 fps para 27 fps devido à gravação das imagens em disco rígido. Os resultados da coleta são descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Coleta de imagens

Tipo	Velocidade	Imagens Capturadas	Número de Voltas	Intersecção com o Laser	Porcentagem
Rasgos	2 km/h	1805	20	19	95%
	4 km/h	2016	40	20	50%
	6 km/h	1933	60	25	41,6%
Cortes	2 km/h	1774	20	20	100%
	4 km/h	2110	40	40	100%
	6 km/h	2018	60	60	100%
Perfurações	2 km/h	1806	20	19	95%
	4 km/h	2112	40	19	47,5%
	6 km/h	2123	60	22	36,6%

Fonte: autor (2019).

Analisando a Tabela 8, em relação às falhas que tiveram intersecção com o laser, verifica-se que, enquanto os cortes obtiveram 100% em todas as velocidades de captura, o mesmo não aconteceu nos modelos de rasgos e perfurações. A diferença ocorre devido a dois fatores: dimensão dos rasgos e perfurações definidas em valores muito reduzidos (pior caso) e a velocidade de captura da *webcam* (30 fps) em relação à velocidade da correia transportadora. Pretende-se, futuramente, aumentar a porcentagem de intersecção entre as falhas e o *laser*, adotando uma ou todas as abordagens a seguir:

a) Pesquisar e adotar uma *webcam* com maior taxa de quadros por segundo, como 60 fps, 120 fps, etc.

b) Estudar a possibilidade de aumentar a faixa do *laser* adicionando ao seu projeto uma lente biconvexa (Figura 116) e, conseqüentemente, aumentar a faixa do ROI.

Figura 116 - Ampliação da linha do laser

Fonte: autor (2019).

As imagens captadas, processadas e armazenadas foram separadas em 4 grupos: imagem completa (imgOriginal), imagem área ROI (imgCrop), imagem binarizada (imgBinary) e imagem com detecção de bordas (imgEdge) (Figura 117).

Figura 117 - Banco de Imagens.

Fonte: autor (2019).

Estuda-se a possibilidade, caso haja interesse da comunidade acadêmica, de disponibilizar esse banco de imagens. Na Figura 118 exibe-se um conjunto de

imagens num dado momento da captura em que houvesse a intersecção da falha com a linha do *laser*.

Figura 118 - Falha do tipo rasgo: a) imagem completa; b) imagem área ROI; c) imagem binarizada; d) imagem com detecção de bordas.

a)

b)

c)

d)

Fonte: autor (2019).

Com base no banco de imagens, foram selecionadas imagens com detecção de bordas, com e sem falhas, dos 3 modelos nas 3 configurações de velocidades. A seleção foi feita de forma manual e visual, a partir da análise de similaridade entre as imagens. Uma vez selecionadas, as imagens foram recortadas no padrão 150x18

pixels (dimensão da janela deslizante) no *software Adobe Fireworks*. Os recortes foram posicionados de forma a minimizar o número de imagens semelhantes. O resultado para cada modelo é descrito na Tabela 9.

Tabela 9 - Quantidade de amostras por tipo de falha.

Tipos	Com Falha	Sem Falha
Rasgos	190	190
Cortes	140	140
Perfurações	130	130
Conjunto Completo	460	460

Fonte: autor (2019).

5.5.3 Redimensionamento das imagens (*Janela Deslizante*)

Ensaio preliminares de captura com a webcam C920, com resolução de 1920x1080 e janela deslizante de 90x9 pixels, não apresentaram um grau de distinção entre uma amostra com falha e sem falha, dificultando, assim, a classificação das mesmas. Alterando as dimensões de 90x9 pixels para 150x18 pixels, houve uma melhora significativa na classificação das amostras.

5.6 Extrações de características

A partir dessa etapa, o Matlab é utilizado como ferramenta de desenvolvimento, devido à sua versatilidade em investigar e simular prototipagens.

A extração de características teve como base as imagens recortadas armazenadas no banco de imagens.

5.6.1 Redução de escala

Como a finalidade dessas imagens é gerar o vetor descritor, as mesmas passaram por um processo de redução de escala, visando a reduzir a quantidade de dados do vetor descritor, assim como, respectivamente, diminuir a quantidade de sinais de entrada da rede, o que, conseqüentemente, reduz o esforço computacional.

Para acelerar os cálculos da redução de escala, cada imagem selecionada foi convertida para imagem integral (VIOLA, 2004; DERPANIS, 2007). Viola e Jones (2004) citam que a vantagem da imagem integral é permitir obter o valor de uma soma retangular com apenas quatro valores de memória.

5.6.2 Imagem integral

O valor de uma coordenada (x, y) de uma imagem integral é calculado somando-se o valor da mesma coordenada da imagem original com os valores dos pixels acima e à sua esquerda, conforme demonstrado pela Equação 5.4.

$$ii(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y'), \quad (5.4)$$

Em que $ii(x, y)$ é a imagem integral e $i(x', y')$ é a imagem selecionada.

O algoritmo executa uma única passagem sobre a imagem selecionada, calculando a seguinte relação de recorrência para obter a imagem integral, de acordo com as Equações 5.5 e 5.6:

$$s(x, y) = s(x, y - 1) + i(x, y) \quad (5.5)$$

$$ii(x, y) = ii(x - 1, y) + s(x, y) \quad (5.6)$$

A soma dos valores de pixel dentro de uma região retangular da imagem, é obtida utilizando quatro valores da matriz $ii(x, y)$, seguindo a Equação 5.7 e a Figura 119.

$$A = L_4 + L_1(L_2 + L_3) \quad (5.7)$$

Figura 119 - Imagem integral: a) Representação da imagem integral;
b) Região retangular.

Fonte: Derpanis (2007, p. 2).

A redução é obtida calculando-se o resultado da soma dos valores dentro de regiões retangulares de 3x3 pixels. Se o resultado for igual ou superior a 255, ou seja, tenha pelo menos um pixel branco, a região recebe o valor 1, caso contrário, valor 0 (Figura 120).

Figura 120 - Regiões retangulares da janela deslizante

Fonte: autor (2017).

5.6.2.1 Fase de Validação

O vetor descritor resultante, 30x3, foi convertido para uma matriz 90x1, de forma a ficar compatível com a rede neural e SVM. Ao final do processamento, 1920 amostras foram selecionadas para compor o vetor descritor, sendo 960 com falhas e 960 sem falhas. A composição ocorreu intercalando uma amostra de cada, com e sem falha (Figura 121).

Figura 121 - Composição do vetor descritor.

Fonte: autor (2019).

5.6.2.2 Fase de Aprimoramento

Foram criados 4 vetores descritores, sendo um para cada tipo de falha e o último composto pelo agrupamento dos 3 vetores descritores anteriormente.

Cada vetor descritor resultante, 50x6, foi convertido para uma matriz 300x1 de forma a ficar compatível com a rede neural e SVM. A Tabela 10 exhibe a quantidade de amostras contidas em cada vetor descritor. A composição ocorreu intercalando uma amostra de cada, com e sem falha (Figura 121).

Tabela 10 - Tamanho dos vetores descritores.

	Com Falha	Sem Falha	Vetor Descritor
Rasgos	190	190	380
Cortes	140	140	280
Perfurações	130	130	260
Conjunto Completo	460	460	920

Fonte: autor (2019).

5.6.3 Processamento em paralelo

Vislumbrando a efetivação de um monitoramento em tempo real, a metodologia adotou o processamento em paralelo, nas etapas de aquisição de imagem, pré-processamento e segmentação para gerar o banco de imagens.

O sistema operacional utiliza processos para a execução de programas (TANENBAUM; WOODHYLL, 1999). O processo possui características que incluem pilha de processo para armazenar dados temporários (variáveis locais, parâmetros e endereço de retorno de métodos) e uma seção de dados para armazenamento de variáveis locais. O programa pode estar associado a um ou mais fluxos de execução em um processo. O fluxo de execução é conhecido como *thread*. Variando-se a quantidade de *threads*, um único processo pode executar várias tarefas por vez (SILBERSCHATZ et al., 2004).

Para atender à necessidade de velocidade no processamento das imagens, foram criados 10 *threads* para o processamento. Devido às altas taxas de processamento envolvidas no tratamento das imagens adquiridas, observou-se que o protótipo, utilizando apenas um *thread*, conseguia taxas de processamento na ordem de 7 a 8 fps. Alterando de um para dez *threads*, alcançaram-se taxas de 30 fps.

A aquisição das imagens é feita continuamente e cada imagem obtida pela *webcam* recebe um *thread* específico, obedecendo a uma sequência pré-determinada.

5.7 Classificação

Este trabalho tem como objetivo inicial classificar as amostras em duas classes, sendo elas “falha” e “não falha”. Pretende-se, em trabalhos futuros, diferenciar esses

tipos de falhas em mais classes, como exemplo: rasgos, cortes, perfurações, emendas, desgastes, desalinhamento, entre outros.

Outro fator importante, ao se optar por um classificador, está nos potenciais fatores de problemas na detecção de falhas provenientes das características de emendas da correia transportadora. Segundo Procel (2009), emendas de correia podem ser feitas a frio, quente e com grampos ou taliscas metálicas. Nesta última, são utilizados parafusos e porcas para unir as superfícies da correia metálica, além de grampos (MAZURKIEWICZ, 2008) (Figura 122).

Figura 122 - Emendas de correia transportadora

Fonte: a) Mazurkiewicz (2008, p. 480), b) Procel (2009, p. 48) e c) Swinderman (2009, p. 58).

Fatores como esses podem dificultar ou gerar falsos alarmes de detecção de falhas. Pretende-se, em trabalhos futuros, que o classificador identifique as emendas mecânicas como emendas e não como falhas da correia transportadora.

Para investigar qual técnica de classificação se adequa melhor ao cenário deste projeto, foram testados e avaliados os usos de RNA e SVM.

5.7.1 Classificação (RNA)

O classificador adotado foi uma rede neural com arquitetura do tipo PMC, algoritmo Levenberg-Marquardt, taxa de aprendizado de 0.5 e valor de 10^{-6} para a precisão requerida. Valores aleatórios entre 0 e 1 foram utilizados para iniciar tanto os pesos sinápticos, quanto os limiares de ativação.

5.7.1.1 Fase de Validação

A rede neural PMC possui 90 sinais de entradas, $x_i (i = 1, 2, \dots, 90)$, advindos do vetor descritor anteriormente, formatado em 90×1 . A Figura 123 ilustra a arquitetura e as topologias descritas.

Figura 123 - Arquitetura PMC e topologias

Fonte: autor (2019).

5.7.1.2 Fase de Aprimoramento

A rede neural PMC, para essa fase, foi alterada para 300 sinais de entradas, $x_i (i = 1, 2 \dots, 300)$, advindos do vetor descritor, anteriormente formatado em 300×1 .

5.7.1.3 Fase de Validação e Aprimoramento

A topologia adotou, inicialmente, uma única camada oculta, com a função de ativação logística para cada neurônio. A definição da quantidade de neurônios foi realizada por meio de ensaios utilizando 15 topologias candidatas, iniciando com 1 neurônio, e incrementando-se um por vez, até 15 neurônios.

A camada de saída possui dois neurônios, com função de ativação linear. A adoção de dois neurônios tem como base o método *One Of C-Classes* (SILVA et al., 2010), que consiste em associar cada neurônio da camada de saída a uma respectiva classe. Assim, apenas um neurônio por vez estará ativo, de acordo com a classe associada, conforme descrito na Tabela 11.

Tabela 11 - Mapeamento para a classificação *one of c-classes*

y_1	y_2	Classe
1	0	Não Falha
0	1	Falha

Fonte: autor (2019).

5.7.2 Classificação (SVM)

No ensaio inicial, adotou-se, para o classificador SVM, a configuração de função de *kernel* linear. Em seguida, quatro novos ensaios foram efetuados, utilizando-se, como função *kernel*, quadrática, polinomial, gaussiano ou RBF (*Radial-Basis Function* – Função de Base Radial) e MPL (*Multilayer Perceptron* – Perceptron Multicamada). O classificador recebe como entrada o vetor descritor, anteriormente formatado em 90×1 ou 600×1 , tendo, como saída, y , duas classes, conforme ilustrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Mapeamento para a classificação SVM.

y	Classe
1	Não Falha
0	Falha

Fonte: autor (2019).

5.7.3 Treinamento

A etapa de treinamento, tanto para RNA como para o SVM, adotou-se o método de validação cruzada usando k-partições (Figura 124). Assim, o processo de treinamento é repetido até que todas as k-partições tenham sido apresentadas como subconjunto de teste.

Figura 124 - Método de validação cruzada usando k-partições

Fonte: Adaptado de SILVA et al. (2010, p. 150).

A cada repetição, a quantidade de amostras é dividida em dois subconjuntos: subconjunto de treinamento e subconjunto de teste. Pretende-se, com essa forma de

distribuição e configuração, a máxima generalização dos classificadores quando submetidos às amostras de teste.

5.7.3.1 Fase de Validação

As quantidades de amostras disponíveis para cada subconjunto são exibidas na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição de amostras.

Total de Amostras: 1920		
Perc.	Qtde	Objetivo
10%	192	Treinamento
90%	1728	Teste

Fonte: autor (2019).

5.7.3.2 Fase de Aprimoramento

Tendo em vista a simulação de vários tipos de falhas e após ensaios preliminares dessa fase, optou-se por treinar cada tipo separadamente e, em seguida, o conjunto completo. As quantidades de amostras disponíveis para cada subconjunto são exibidas na Tabela 14.

Tabela 14 - Distribuição de amostras

Tipo	Total	Treinamento		Teste	
		Perc.	Qtde	Perc.	Qtde
Rasgo	380	10%	38	90%	342
Cortes	280	10%	28	90%	252
Perfurações	260	10%	26	90%	234
Conjunto Completo	920	10%	92	90%	828

Fonte: autor (2019).

5.8 Conclusão

Este capítulo apresentou os principais conceitos e passos adotados no desenvolvimento do método, como também uma estrutura física, em escala laboratorial, para simular uma correia transportadora real para validar o protótipo de detecção de falhas.

No próximo capítulo é apresentada a abordagem adotada no treinamento e os resultados obtidos em ensaios realizados com os classificadores RNA e SVM.

CAPÍTULO 6

6 TREINAMENTO DOS CLASSIFICADORES E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas as abordagens adotadas nos treinamentos das topologias candidatas da RNA e para cada função *kernel* SVM e os resultados alcançados. Por fim, é feita uma comparação do melhor resultado obtido entre os dois classificadores, levando em consideração a sensibilidade média.

6.1 Treinamento RNA

6.1.1 Fase de Validação

Para selecionar a melhor topologia, desenvolveu-se um algoritmo no Matlab utilizando técnicas de validação cruzada, inspiradas em Moraes et al., 2013 e detalhadas logo a seguir (Figura 125).

Foram selecionadas 15 topologias candidatas, iniciando com 1 neurônio, com incrementos unitários até 15 neurônios. Dada nova configuração de topologia, são efetuados 10 ensaios, visando a evitar os mínimos locais da função de erro, devido à inicialização dos pesos ser aleatória. Esse processo completo é repetido por 30 vezes.

Figura 125 - Algoritmo de treinamento RNA

```

Enquanto (Iterações ≤ 30) Faça
{
  Enquanto (QtdeNeurônio ≤ 15) Faça
  {
    Enquanto (Treinamento ≤ 10) Faça
    {
      Amostra de Treinamento = desloca (k Partições)
      Amostra de Teste = desloca (k Partições)

      Cria Topologia Candidata (QtdeNeurônio)
      Treinar RNA (Amostra de Treinamento)
      Testar RNA (Amostra de Teste)

      Armazenar resultados do ensaio

      Treinamento ++
    }
    QtdeNeurônio ++
  }
  Iterações ++
}
  
```

Fonte: autor (2019).

Antes de iniciar cada novo treinamento, todas as métricas, considerando os 10 ensaios de cada topologia candidata, são armazenadas

As métricas utilizadas tanto para o classificador utilizando redes neurais quanto para o classificador SVM foram:

a) TP (*True Positive* - Verdadeiro Positivo): o elemento de entrada é genuíno e o classificador o classifica como genuíno.

b) TN (*True Negative* - Verdadeiro Negativo): o elemento de entrada é impostor e o classificador o classifica como impostor.

c) FP (*False Positive* - Falso Positivo): o elemento de entrada é impostor e o classificador o classifica como genuíno.

d) FN (*False Negative* - Falso Negativo): o elemento de entrada é genuíno e o classificador o classifica como impostor.

e) Sens (*Sensibilidade*): proporção de amostras genuínas (com falha) classificadas como genuínas, conforme Equação 6.1:

$$Sens = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6.1)$$

f) Esp (*Especificidade*): proporção de amostras impostoras (sem falha) classificadas corretamente como impostoras, conforme Equação 6.2:

$$Esp = \frac{TN}{TN+FP} \quad (6.2)$$

g) Prec (*Precisão*): proporção de amostra genuínas classificadas corretamente, conforme Equação 6.3:

$$Prec = \frac{TP}{TP+FP} \quad (6.3)$$

h) Exa (Exatidão - Acurácia): proporção de classificações corretas tanto para amostras genuínas quanto para impostoras, conforme Equação 6.4:

$$Exa = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FP} \quad (6.4)$$

i) Err (Erro): taxa de elementos classificados erroneamente, conforme Equação 6.5:

$$Err = \frac{FP+FN}{TP+FN+TN+FP} \quad (6.5)$$

Entre todas as métricas disponíveis, a sensibilidade média foi eleita como o parâmetro que melhor representa o potencial de classificação da rede. A topologia com melhor média de sensibilidade é selecionada para análise final, após a execução de toda a rotina de treinamento.

Os resultados, obtidos das métricas, são apresentados na Tabela 15, por ordem decrescente de média de sensibilidade das topologias candidatas.

Tabela 15 - Resultados dos treinamentos: NT = número do treinamento; QN = quantidade de neurônios; SENS = sensibilidade; ESP = especificidade; PREC = precisão; EXA = exatidão; ERR = erro

NT	QN	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
21	12	95,8%	98,9%	98,8%	97,3%	2,6%
25	9	95,5%	96,4%	96,5%	96,0%	3,9%
28	1	95,5%	97,1%	97,1%	96,3%	3,6%
5	13	95,4%	97,5%	97,5%	96,5%	3,5%
10	15	95,4%	98,0%	97,9%	96,7%	3,2%
12	13	95,4%	98,6%	98,5%	97,0%	2,9%
4	3	95,2%	98,3%	98,3%	96,8%	3,1%
23	15	95,2%	98,5%	98,4%	96,8%	3,1%
27	15	95,0%	98,1%	98,1%	96,5%	3,4%
9	12	94,9%	97,7%	97,7%	96,3%	3,6%
26	14	94,9%	98,5%	98,4%	96,7%	3,2%

NT	QN	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
24	2	94,9%	97,5%	97,5%	96,2%	3,7%
29	15	94,9%	97,6%	97,6%	96,2%	3,7%
8	9	94,8%	98,3%	98,2%	96,6%	3,4%
16	13	94,8%	97,8%	97,7%	96,3%	3,6%
17	14	94,8%	98,8%	98,7%	96,8%	3,1%
18	15	94,8%	98,3%	98,3%	96,5%	3,4%
11	6	94,7%	98,2%	98,2%	96,5%	3,4%
20	14	94,7%	98,3%	98,3%	96,5%	3,4%
19	3	94,7%	98,9%	98,9%	96,8%	3,1%
6	1	94,6%	98,8%	98,8%	96,7%	3,2%
30	2	94,6%	98,1%	98,0%	96,3%	3,6%
14	4	94,5%	98,3%	98,3%	96,4%	3,5%
22	5	94,5%	97,5%	97,4%	96,0%	3,9%
3	1	94,5%	98,5%	98,5%	96,5%	3,4%
7	2	94,5%	97,8%	97,8%	96,2%	3,8%
2	1	94,4%	97,8%	97,8%	96,1%	3,8%
15	6	94,3%	96,8%	96,9%	95,6%	4,3%
13	12	94,2%	98,6%	98,5%	96,4%	3,5%
1	15	94,2%	98,0%	97,9%	96,1%	3,8%

Fonte: autor (2019).

Analisando-se a Tabela 15, observa-se que algumas topologias candidatas repetiram-se mais que uma vez, enquanto outras não obtiveram a melhor sensibilidade para serem escolhidas.

Apresenta-se na Figura 126 a frequência de repetições das topologias candidatas selecionadas ao final do treinamento.

Figura 126 – Frequência de repetições de topologias candidatas

Fonte: autor (2019).

Analisando os resultados da Tabela 15 e Figura 126, é identificado que, apesar de a topologia com 15 neurônios ser a mais frequente (6 vezes) ao final do treinamento, a melhor média de sensibilidade, 0,9582 (95,8%), foi obtida na topologia candidata com 12 neurônios, treinamento 21. O gráfico da Figura 127 exhibe as sensibilidades médias das topologias resultantes do treinamento 21.

Figura 127 - Sensibilidade média do treinamento 21

Fonte: autor (2019).

Uma vez definida a melhor topologia, 12 neurônios, treinamento 21, foi investigado qual dos dez ensaios alcançou a maior sensibilidade.

Apresenta-se na Tabela 16 os resultados desses ensaios por ordem decrescente de valor de sensibilidade. A maior sensibilidade ocorreu no nono ensaio, com o valor de 0,9873 (98,7%).

Tabela 16 - Treinamento 21. Ensaio topologia 12 neurônios: ENS = ensaio; SENS = sensibilidade; ESP = especificidade; PREC = precisão; EXA = exatidão.

ENS	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
9	98,7%	100%	100%	99,3%	0,6%
2	98,2%	100%	100%	99,1%	0,8%
5	98,2%	97,6%	97,7%	97,9%	2,0%
3	97,3%	98,1%	98,1%	97,7%	2,2%
6	97,1%	97,9%	97,9%	97,5%	2,4%
7	96,5%	100%	100%	98,2%	1,7%
8	96,5%	99,8%	99,8%	98,2%	1,7%
4	95,1%	98,5%	98,4%	96,8%	3,1%
10	94,3%	99,8%	99,8%	97,1%	2,8%
1	86,0%	97,1%	96,7%	91,5%	8,4%

Fonte: autor (2019).

Para esse ensaio, pode-se avaliar a sua classificação com o auxílio da tabela de contingência (matriz confusão), representada pela Tabela 17 para as 1728 amostras de teste. Essa topologia será utilizada na fase de comparação com SVM.

Tabela 17 - Tabela de contingência resultante.

SAÍDA DESEJADA	ENTRADAS		
		Falha	Não Falha
	Falha	853	0
	Não Falha	11	864

Fonte: autor (2019).

6.1.2 Fase de Aprimoramento

Foram selecionadas 15 topologias candidatas, iniciando com 1 neurônio, com incrementos unitários até 15 neurônios. Dada uma nova configuração de topologia, foram efetuados 10 ensaios, visando a evitar os mínimos locais da função de erro, devido à inicialização dos pesos ser aleatória.

Baseado nos resultados obtidos na fase de validação, optou-se por descartar a repetição de 30 vezes para cada total de treinamento. Essa decisão foi tomada devido aos valores de sensibilidade bem próximos uns dos outros em cada interação. Sendo assim, levou-se em consideração apenas a melhor sensibilidade de cada treinamento ao invés da média da sensibilidade.

Os resultados obtidos das métricas, em relação aos conjuntos de treinamento dos 3 modelos individuais de rasgos, perfurações, cortes e, por fim, com todas as amostras juntas, são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados dos treinamentos: QN = quantidade de neurônios;
SENS = sensibilidade; ESP = especificidade; PREC = precisão;
EXA = exatidão; ERR = erro.

Tipo	QN	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
Rasgo	7	100,00%	91,23%	91,94%	95,61%	4,39%
Perfurações	2	100,00%	99,21%	99,21%	99,60%	0,40%
Cortes	5	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Conjunto Completo	4	100,00%	99,03%	99,04%	99,52%	0,48%

Fonte: autor (2019).

A maior sensibilidade para o conjunto completo das amostras foi o treinamento com 4 neurônios, com o valor de 1,0 (100%). Com o auxílio da tabela de contingência (matriz confusão) (Tabela 19), podem-se avaliar suas classificações para as amostras de teste correspondentes.

Tabela 19 - Tabela de contingência resultante - Conjunto Completo.

SAÍDA DESEJADA	ENTRADAS		
		Falha	Não Falha
	Falha	414	4
	Não Falha	0	410

Fonte: autor (2019).

6.2 Treinamento SVM

6.2.1 Fase de Validação

No processo de treinamento do classificador SVM, foram executados 5 conjuntos de treinamento no Matlab, um para cada função *kernel*: linear, quadrática, polinomial, gaussiano ou RBF e MPL. Cada treinamento foi composto por 10 ensaios, de forma a contemplar todas as k-partições de teste.

Para cada ensaio, foram calculadas todas as métricas utilizadas para o classificador na RNA. Para selecionar o melhor modelo de *kernel*, foi calculada a média de cada métrica, considerando os 10 ensaios ao final dos treinamentos. Entre todas as métricas disponíveis, a sensibilidade média foi eleita novamente como parâmetro que melhor representa o potencial de classificador. A Tabela 20 exibe a sensibilidade média, por ordem decrescente de média de sensibilidade para cada modelo de *kernel*.

Tabela 20 - Média de sensibilidade por configuração: KNL = Kernel; LN = linear;

QD = quadrática; PL = polinomial; RBF = radial-basis function;

PMC = perceptron multicamada; ENS = ensaio; SENS = sensibilidade;

ESP = especificidade; PREC = precisão; EXA = exatidão.

KNL	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
LN	97,2%	95,9%	96,2%	96,6%	3,4%
QD	96,4%	97,0%	97,2%	96,7%	3,2%
PL	95,7%	99,1%	99,0%	97,4%	2,5%
PMC	91,8%	82,0%	83,9%	86,9%	13,0%
RBF	82,2%	66,0%	78,5%	74,1%	25,8%

Fonte: autor (2019).

Analisando a Tabela 20, é identificado que os ensaios com *kernel* linear obtiveram a maior sensibilidade média, 0,9728 (97,2%). O gráfico da Figura 128 ilustra as sensibilidades do ensaio *kernel* linear, e a Tabela 21 apresenta os resultados em ordem decrescente de sensibilidade.

Figura 128 - Sensibilidades do ensaio *kernel* linear

Fonte: autor (2019).

Tabela 21 - Sensibilidades do ensaio *kernel* linear: ENS = ensaio; SENS = sensibilidade; ESP = especificidade; PREC = precisão; EXA = exatidão.

ENS	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
10	99,4%	82,4%	84,9%	90,9%	9,0%
2	99,1%	100,0%	100,0%	99,5%	0,4%
3	99,0%	97,4%	97,4%	98,2%	1,7%
5	98,9%	99,6%	99,6%	99,3%	0,6%
8	98,7%	98,5%	98,5%	98,6%	1,3%
6	98,6%	97,4%	97,4%	98,0%	1,9%
9	98,6%	99,8%	99,8%	99,2%	0,7%
7	98,3%	99,7%	99,7%	99,0%	0,9%
4	97,2%	87,0%	88,2%	92,1%	7,8%
1	84,6%	96,9%	96,5%	90,8%	9,2%

Fonte: autor (2019).

Uma vez definido o melhor modelo de *kernel*, foi investigado qual dos dez ensaios alcançou a maior sensibilidade. Analisando os resultados obtidos (Figura 128 e Tabela 21), encontra-se a melhor sensibilidade no décimo ensaio, com o valor de 0,9942 (99,4%). Para esse ensaio, pode-se avaliar sua classificação com auxílio da tabela de contingência (matriz confusão), exibida pela Tabela 22.

Tabela 22 - Tabela de contingência resultante

SAÍDA DESEJADA	ENTRADAS		
		Falha	Não Falha
	Falha	859	152
	Não Falha	5	712

Fonte: autor (2019).

Comparando-se as duas técnicas e levando em consideração a sensibilidade média obtida nos treinamentos, observa-se uma ligeira vantagem de desempenho na SVM, 0,9728 (97,28%), em relação à RNA, 0,9582 (95,82%).

O cenário se mantém no caso do treinamento na melhor sensibilidade: 0,9942 (99,42%) para o SVM e 0,9873 (98,73%) para a RNA.

6.2.2 Fase de aprimoramento

Esta fase seguiu os mesmos procedimentos da fase de validação, com exceção de que os treinamentos foram efetuados com os conjuntos de treinamento dos 3 modelos individuais, rasgos, perfurações, cortes, e, por fim, com todas as amostras juntas. Os resultados obtidos das métricas são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados dos treinamentos: Média de sensibilidade por configuração.

KNL = Kernel; LN = linear; SENS = sensibilidade;

ESP = especificidade; PREC = precisão; EXA = exatidão.

Tipo	KNL	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
Rasgo	LN	100,00%	95,32%	95,53%	97,66%	2,34%
Perfurações	LN	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Cortes	LN	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%
Conjunto Completo	LN	100,00%	99,52%	99,52%	99,76%	0,24%

Fonte: autor (2019).

Analisando a Tabela 23, na qual se tem o conjunto completo das amostras, é identificado que os ensaios com *kernel* linear obtiveram a maior sensibilidade, 1,00 (100%).

Para os ensaios com *kernel* linear, podem-se avaliar as suas classificações com auxílio da tabela de contingência (matriz confusão), exibida pela Tabela 24.

Tabela 24 - Tabela de contingência resultante - Conjunto Completo

SAÍDA DESEJADA	ENTRADAS		
		Falha	Não Falha
	Falha	414	2
	Não Falha	0	412

Fonte: autor (2019).

Comparando-se as duas técnicas, nessa fase de aprimoramento, levando-se em consideração a melhor sensibilidade obtida nos treinamentos, tem-se 100% para os dois classificadores, RNA e SVM. Desse modo, verifica-se, pelas demais métricas, uma ligeira vantagem da SVM em relação à RNA, conforme demonstrado na Tabela 25.

Tabela 25 - Desempenho dos classificadores.

Tipo	SENS	ESP	PREC	EXA	ERRO
RNA	100,00%	99,03%	99,04%	99,52%	0,48%
SVM	100,00%	99,52%	99,52%	99,76%	0,24%

Fonte: autor (2019).

6.2.3 Comparação entre a fase de validação e a fase de aprimoramento

A Tabela 26 exibe o desempenho dos classificadores tanto na fase de validação, quanto na de aprimoramento. Observa-se uma ligeira melhora de valores de uma fase para outra.

Tabela 26 - Desempenho dos classificadores

Tipo	Validação	Aprimoramento
RNA	0,9873 (98,7%).	1,00 (100%)
SVM	0,9942 (99,4%).	1,00 (100%)

Fonte: autor (2019).

6.2.4 Desempenho do processador

Os resultados obtidos com o desempenho do processador, tanto na fase de avaliação, quanto na de aprimoramento, foram uma média de 50% de uso para uma taxa de aquisição de 30 fps. A média de 50% é considerada aceitável, pois, segundo Machado e Maia (2007), uma faixa considerada ideal para a ocupação do processador está entre 30% a 90%. Abaixo de 30%, indica que o processador está sendo pouco utilizado. Acima da faixa superior, 90%, deve-se ter cuidado pelo fato de estar próxima do limite do processador.

6.3 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentadas as abordagens adotadas nos treinamentos das topologias candidatas da RNA e para cada função *kernel* SVM e os resultados alcançados. Por fim, foi feita uma comparação do melhor resultado obtido dos dois classificadores, levando em consideração a melhor sensibilidade média.

No próximo capítulo, são apresentadas as conclusões da metodologia e as propostas de trabalhos futuros.

7 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma nova proposta para a identificação de falhas em correia transportadora, combinando diversas técnicas, como escaneamento a *laser* 3D, visão computacional e aprendizado de máquinas (RNA e SVM).

Destacaram-se os principais problemas e soluções encontrados relacionados à parte estrutural da metodologia, inicialmente, na aquisição de imagens, principalmente com a deformação dos materiais utilizados na simulação de modelo de falhas e do suporte para sua adaptação a correia transportadora. Em seguida, apresentaram-se os benefícios da utilização do *laser* em linha na metodologia. Primeiramente, na fase de validação, para minimizar os efeitos dos borrões gerados por imagens em movimento e causados pela alta velocidade da correia transportadora. Na fase de aprimoramento, identificou-se uma melhor captura das falhas, utilizando um *laser* de maior espessura em sua linha.

Na etapa de aquisição de imagens, discutiram-se os principais aspectos para obtenção de imagens que pudessem ter um melhor processamento pelo *software* e pelos algoritmos de classificação. Apresentou-se a utilização de dois modelos de *webcam* (C270 e C920). Os ensaios demonstraram que a *webcam* C920, com maior resolução de imagem (1920x1080 pixels), obteve resultados mais significativos no vetor descritor e, conseqüentemente, um melhor desempenho dos algoritmos classificadores. Dois outros componentes foram descritos por serem determinantes na aquisição de imagens com mínima distorção: ajuste de exposição e utilização de uma fonte de luz adicional na estrutura de aquisição. A não utilização desses componentes demonstrou imagens com o efeito de borrão do *laser* onde não deveriam ocorrer: sobre perfurações e cortes. Imagens com o efeito mencionado, aliadas a perfurações e cortes de dimensões muito reduzidos, tiveram baixa detecção de falhas. Após a adoção dos componentes, houve uma redução drástica do efeito do borrão sobre perfurações e cortes, aumentando, assim, a detecção de falhas.

Observou-se, na coleta de imagens, uma relação entre a passagem do modelo de simulação de falha pela área ROI. Em velocidades muito elevadas da correia transportadora, com as dimensões de modelos de falhas muito reduzidas do tipo

rasgos e perfurações, há uma diminuição da incidência da falha sobre a ROI. No caso do modelo de falha do tipo corte, o sistema apresentou 100% de incidência, mantendo um alto grau de classificação do sistema proposto.

Com a utilização da C920, foi possível redimensionar a janela deslizante e, mantendo a proporção na redução de escala de regiões retangulares de 3x3 pixels, obteve-se um vetor descritor altamente discriminante, possibilitando um alto grau de classificação das falhas como demonstrado nos resultados dos classificadores.

De acordo com os resultados discutidos na seção acima, conforme tabelas de contingência, a proposta mostrou-se promissora na tarefa de diagnosticar e classificar falhas em correias transportadoras. Isso prova, também, que o vetor descritor criado possui informações de forte relevância, diferindo-se facilmente entre os tipos de classe, falha e não falha.

Houve uma dificuldade em comparar o desempenho do presente método com os dos pesquisadores apresentados na revisão bibliográfica. Alguns fatores foram determinantes nesses aspectos. Entre eles, destaca-se a falta de informações de um ou mais itens, tais como, em quais velocidades da correia transportadora e dimensões de falhas (cortes, perfurações e rasgos) foram efetuados os estudos, além de conjuntos de dados diferentes entre as pesquisas.

Conclui-se que o método aqui desenvolvido mostra-se promissor para garantir a máxima disponibilidade e confiabilidade, a um custo otimizado, do sistema de transporte, por meio do diagnóstico de falhas de operação da correia transportadora, que possam gerar um longo período de tempo de inatividade, ameaçar a segurança, e gerar perdas financeiras significativas.

A utilização da metodologia em uma aplicação real está sujeita a testes adicionais em ambiente industrial.

Para trabalhos futuros, além da unificação da etapa do Matlab com o sistema desenvolvido, serão realizados testes em condições reais de operação para avaliar a robustez da metodologia, e efetuar ajustes, caso necessário.

7.1 Continuidade da pesquisa

Os itens listados abaixo têm como objetivo serem analisados e, caso sejam avaliados como pertinentes, serão implementados em trabalhos futuros.

- a) Ampliar a faixa do *laser* para uma maior detecção de falhas;
- b) Unificar a etapa do Matlab com o sistema desenvolvido em VB.NET;
- c) Realizar testes em condições reais de operação, na versão unificada, para avaliar a robustez da metodologia e efetuar ajustes, caso necessário;
- d) Propor a criação de graus de severidade de falhas, gerando, assim, diferentes níveis de alarme;
- e) Analisar a possibilidade de detecção para rasgos de bordas, emendas, entre outros;
- f) Ampliar o banco de dados de imagens com diversos tipos de falhas, tais como rasgos de bordas e emendas;
- g) Analisar a viabilidade do armazenamento das falhas ocorridas em um banco de dados, a fim de que seja utilizado para diagnósticos preditivos de falhas. Para tanto, seriam armazenados dados de operação da correia transportadora, como data e hora do alarme de falha, severidade da falha, horário de parada e reinício da correia transportadora mediante a detecção de falhas, tempo de operação do sistema, etc.;
- h) Implementação de algoritmo de controle do desalinhamento da correia transportadora utilizando lógica *Fuzzy*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6177:1999. **Transportadores contínuos** - Transportadores de correia, 1999.

ALDRICH, J.; ZHANG, Y. Minimizing Belt Wear and Damage From Optimized Chute Design. **SME Annual Meeting**, p. 1-7, 2014.

ALSPAUGH, M. A. Latest Developments in Belt Conveyor Technology. **Presented at MinExpo**, p. 1-10, 2004.

ALSPAUGH, M.; DEWICKI, G. Advanced Design Considerations Required for Overland Aggregate Conveyors. **Presented at 2003 SME Annual Meeting**, p. 1-13, 2003.

ARAÚJO, R. **Aumento de confiabilidade em correias transportadoras por manutenção preventiva e corretiva**. 2010. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Mineral) Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

ARRUDA, G. Alinhamento necessário. **Revista Minérios & Minerales**, v. 369, p. 8-14, 2015.

ASSOCIATION FOR RUBBER PRODUCTS MANUFACTURERS. **ARPM IP1:2011 Conveyor And Elevator Belt Handbook**. 4st ed. Indianapolis, 2011.

AZEVEDO, E; CONCI, A. **Computação Gráfica-Teoria e Prática**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, p. 198, 2003.

BAGGIO, D. L. et al. **OpenCV with practical computer vision projects: step-by-step tutorials to solve common real-world computer vision problems for desktop or mobile, from augmented reality and number plate recognition to face recognition and 3D head tracking**. P. 20-167, 2012.

BELTSCAN SYSTEMS PTY LTD. **BG5k Fabric Belt Rip Detector**. Disponível em: <<http://www.beltscan.com/products/belt-guard-5k-fabric-belt-rip-detector.html>> Acesso em 10 fev. 2017.

BÖSEMANN, W. Advances in Photogrametric Measurement Solutions. Computers in Industry. Vol. 56, No. 8. pp. 886-893, 2005.

CAMARGO, R. Travamento ou ruído nos rolos. **Metso Service Tips**, 40th ed. 2011.

CAMARGO, R. Medição de capacidade dos transportadores de correia. **Metso Service Tips**, 57st ed. 2012.

CECALA, A. B. et al. **Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing** The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2012.

CHUNXIA, Y.; SI, C. A new detection device of belt longitudinal rip based on pressure monitoring. **International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)**, p. 60-63, 2011.

COELHO, M. M. **Sistema Automático de Detecção de Falhas em Rolamentos de Roletes de Correias Transportadoras**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais Escola De Engenharia, 2010.

COLOGNA, D. Maior correia transportadora suspensa do mundo irá deslocar 1.500 t/h. **Revista Minérios & Minerales**, v.368, p. 16-18, 2015.

CONTITECH AG. **Conveyor Belts**. Disponível em: <http://www.contitech.de/pages/presse/bilder-videos/prb-transportbaender_en.html> Acesso em: 02 fev. 2017

CONVEYOR BELT GUIDE. **Laser rip detection**. Disponível em: <<http://conveyorbeltguide.com/rip-detection.html>> Acesso em: 03 jul. 2017.

DENG, L. J.; GUO, H.; HUANG, T. Z. A fast image recovery algorithm based on splitting deblurring and denoising. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 287, p. 1-17, 2015.

DENG, X. et al. Video-based non-uniform object motion blur estimation and deblurring. **Neurocomputing**, v. 86, p. 170-178, 2012.

DERPANIS, K. G. Integral image-based representations. **Conference Proceedings**, p. 1-6, 2007.

DESHMUKH, P. M.; JADHAO, K. K.; VITHALKAR, P. R. Failure Detection And Prevention For Charging Belt Conveyor. **International journal of pure and Applied research in engineering and Technology**, v. 2, p. 260-268, 2014.

DUNLOP, F. Conveyor Belt Technique Design and Calculation, 1994.

EAGLEVISION TECNOLOGIAS EM SEGURANÇA. Caixa de Proteção EE-HWD614. Disponível em: <http://www.eaglevision.com.br/PDF-CxProte/EagleVision_CX-PROT_Wiper_DH_EE-HW614.pdf> Acesso em: 11 jan. 2019.

FALKENBERG, S.; WENNEKAMP, T. Doping of conveyor belt materials with nanostructured fillers to adapt innovative performance characteristics. **IEEE International Conference on Automation and Logistics**, p. 1526-1533, 2008.

FEDORKO, G. et al. Failure analysis of belt conveyor damage caused by the falling material. Part I: Experimental measurements and regression models. **Engineering Failure Analysis**, v. 36, p. 30-38, 2014.

GARCÍA, P. L. **Design of a belt conveyor for iron ore**. 2016. Dissertação (A master's thesis of the second-cycle master's study programme in MECHANICAL ENGINEERING) - Faculty of Mechanical Engineering - University of Ljubljana, 2016.

GOODYEAR. **CONVEYOR BELT: INSTALLATION, MAINTENANCE & TROUBLESHOOTING GUIDE.** Disponível em: <http://www.goodyearrubberproducts.com/2010newpdfs/ConveyorBeltMaintenanceManual2010.pdf> Acesso em: 10 mar. 2017.

GOOGLE EARTH. **Bou Craa mine** Disponível em: [http://www.satellite-sightseer.com/id/9878/Western Sahara/Bou Craa/Bou Craa phosphate mines](http://www.satellite-sightseer.com/id/9878/Western%20Sahara/Bou%20Craa/Bou%20Craa%20phosphate%20mines) Acesso em: 2 jan. 2017.

GUPTA, A. Analysis for Controlling Belt Deviation in Conveyor System. **Journal of Mechanical and Industrial Engineering Research**, v. 3, n. 1, p. 40-45, 2014.

GURJAR, R. S.; YADAV, A.; JAYASWAL, P. Failure analysis of belt conveyor system in a thermal power plant. **International Journal of Advanced Technology & Engineering Research**, p. 204-210, 2012.

HORNEBER, A. **Handbook of Machine Vision.** WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, p. 168, 2006.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. CASAGRANDE, T. M. **Detector de rasgo tipo foto-eletrico.** BR nº PI 0704295-7 A2, 2007, 19 out. 2007, 23 jun. 2009.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. CASAGRANDE, T. M. **Detector de rasgo tipo linha.** BR nº PI 0704330-9 A2, 19 out. 2007, 08 set. 2010

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. LIMA, J. B. **Chave detectora de rasgo em correia transportadora.** BR nº PI0803332-3 A2, 01 set. 2008, 08 jun. 2010a.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. LIMA, J. B. **Chave detectora de rasgo em correia transportadora de cavalete de vidro.** BR nº PI 0803329-3 A2, 19 set. 2008, 08 jun. 2010b.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. LIMA, J. B. **Chave detectora de rasgo em correia transportadora de sensores laser.** BR nº 1O 2012 015846-9 A2, 27 jun. 2012, 23 set. 2014.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. LIMA, J. B. **Chave detectora de rasgo em correia transportadora de bandeja de tela.** BR nº PI 0804799-5 B1, 07 nov. 2008, 27 jan. 2015.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. LIMA, J. B. **Chave detectora de rasgo em correia transportadora do tipo carga e retorno.** BR nº PI 0925170-7 A2, 23 jun. 2009, 24 mai. 2016.

Instituto Nacional da Propriedade Industrial. SILVA, L. F.; MACHADO, L. H. **Sistema e método para detecção de rasgo em correia transportadora mediante análise da frequência de vibração.** BR nº 102013000469-3 A2, 01 ago. 2013, 15 mar. 2016.

KAU C. H.; RICHMOND S.; INCRAPER A.; ENGLISH J.; XIA J. J. Three-dimensional surface acquisition systems for the study of facial morphology and their

application to maxillofacial surgery. *Int J Med Robotics Comput Assist Surg*, 3: 97-110, 2007.

KAUSHIK. **Long Distance Conveyor Belts.** Disponível em: <http://www.amusingplanet.com/2014/04/long-distance-conveyor-belts.html>> 23 de abr. 2017.

KUMAR, A.; BASHA, S.; SREENIVASULU, M. Optimization of power consumption of belt conveyer system by replacing adjustable non-contact type internal scraper. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 04, n. 10, p. 348-355, 2015.

LI, J.; MIAO, C. The conveyor belt longitudinal tear on-line detection based on improved SSR algorithm. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, v. 127, n. 19, p. 8002-8010, 2016.

LI, X. G.; MIAO, C. Y.; ZHANG, J. W. Automatic Defect Detection Method for the Steel Cord Conveyor Belt Based on Its X-Ray Images. **International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)**, p. 1-4, 2011.

LUCAS, J. D. **Improving Conveyor Belt Safety Training Through the Use of Virtual Reality.** 2008. Dissertação (Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial) - faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.

LUZ, A. M., & ÁLVARES, B. A. Física Ensino Médio Volume 2. Scipione, p. 263, 2006.

MACHADO, F. B.; MAIA, L. P. **Arquitetura de sistemas operacionais.** 4th ed, TC – Livros Técnicos Editora S.A, p.135-152, 2007.

MAZURKIEWICZ, D. Computer system for monitoring conveyor belt joints. **Canadian Mining Journal**, p. 24, 2007.

MAZURKIEWICZ, D. Analysis of the ageing impact on the strength of the adhesive sealed joints of conveyor belts. **Journal of Materials Processing Tech**, v. 208, p. 477-485, 2008.

MAZURKIEWICZ, D. Problems of numerical simulation of stress and strain in the area of the adhesive-bonded joint of a conveyor belt. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 75-91, 2009.

METSO. Correias Transportadoras. **Metso Service Tips** 4th ed. 2008. Catalog.

METSO. Conveyor Solutions: Handbook Launch Edition, 2016. Catalog.

MORAES, D. R.; CASATI, B. J.; RODRIGUES, E. L. Analysis of polynomial behavior of the c3 cervical concavity to bone age estimation using artificial neural networks. **Biosignals and Biorobotics Conference (BRC)**, p. 1-6, 2013.

NASA. **Bou Craa, Western Sahara** Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=35524> Acesso em: 02 jan. 2017.

NEKOUFAR, S. Trucks vs. pocket belt conveyors. **Australian Bulk Handling Review Magazine**, p. 68, 2014.

NICOLAY, T.; TREIB, A.; BLUM, A. RF identification in the use of belt rip detection. **Proceedings of IEEE Sensors**, v. 1, p. 333-336, 2004.

PANG, Y. Intelligent Belt Conveyor Monitoring and Control. **Netherlands TRAIL Research School**, 2010.

PANG, Y.; LODEWIJKS, G. A Novel Embedded Conductive Detection System for Intelligent Conveyor Belt Monitoring. **IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics**, p. 803-808, 2006.

PENG, X. A novel image-based method for conveyor belt rip detection. **IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing**, p. 1-4, 2013.

PENG, Z.; GUO-QIANG, N.; TING-FA, X. Image restoration for interlaced scan CCD image with space-variant motion blurs. **Optics & Laser Technology**, v. 42, n. 6, p. 894-901, 2010.

PEREIRA, A. Aumento de disponibilidade em transportador de correia com redução de paradas. **Revista Minérios & Minerales** v. 370, p. 28-29, 2015.

PHOENIX CBS. **Correias transportadoras com cabo de aço**. Disponível em: http://www.phoenix-conveyorbelts.com/pages/products/steel-cord/phoenocord/phoenocord_pt.html Acesso em: 02 fev. 2017.

PROCEL. **Correias Transportadoras**: guia básico, CNI – Confederação Nacional da Indústria, 2009.

QIAO, T.; ZHANG, J. A Research of Image Identification Signal Processing for Longitudinal Rip of the Transport Belt. **International Conference Optoelectronics and Image Processing (ICOIP)**, v. 1, p. 100-103, 2010.

QIAO, T.; LIU, W.; PANG, Y.; YAN, G. Research on visible light and infrared vision real-time detection system for conveyor belt longitudinal tear. **IET Science, Measurement Technology**, v. 10, n. 6, p. 577-584, 2016.

QIAO, T.; TANG, Y.; MA, F. Real-time Detection Technology Based on Dynamic Line-edge for Conveyor Belt Longitudinal Tear. **Journal of Computers**, v. 8, n. 4, p. 1065-1071, 2013.

REVISTA MINÉRIOS & MINERALES. Sistema eletrônico detecta rasgos e desalinhamentos de correias na mina de Germano. **MINÉRIOS & MINERALES**, v. 366, p. 30, 2014.

SAAR, T. A. A DSP-based laser scanner. **11th International Biennial Baltic Electronics Conference**, p. 345-348, 2008.

SANDVIK MINING. Bucket-Wheel Excavators. Disponível em: <<http://mining.sandvik.com/en/products/equipment>> Acesso em: 2 jan. 2017.

SHAPIRO, L.; STOCKMAN, G.C. **Computer Vision**. New Gersey: Prentice-Hall, 2001.

SILBERSCHATZ, A.; GALVIN, P. B.; GAGNE, G. **Fundamentos de Sistemas Operacionais**. 6st ed. LTC – Livro Técnico Editora S.A., p. 63- 66, 2004.

SILVA, I.; SPATTI, D.; FLAUZINO, R. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas**: curso prático. 1st ed. São Paulo: Artliber, 2010.

SUPERIOR-IND. Conveying Components Product Handbook. Disponível em: <<http://superior-ind.com/wp-content/uploads/2017/01/Conveying-Components-Product-Handbook-SPHB1026ENWB-01.pdf>> Acesso em: 10 abr. 2017.

SWINDERMAN, R. T. et al. **FOUNDATIONS 4**: The Practical Resource for Cleaner, Safer, More Productive Dust & Material Control. Neponset - Illinois: Martin Engineering Company, 2009.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. Springer, 2011.

TANENBAUM, A. S.; WOODHYLL, A. S. **Sistemas operacionais projeto e implementação**. 2nd ed. Bookman, p. 47-60, 1999.

TAYADE, V. B. et al. Study, Design, Modification And Analysis Of Charging Belt Conveyor System To Set Optimum Results. **International Conference on Recent Advances in Engineering Science and Management**, p. 1031-1039, 2015.

TCI MANUFACTURING. **Conveyors**. Disponível em: <<http://tcimfg.com/mining-and-aggregate-equipment/conveyors>> Acesso em: 15 fev. 2017.

TIE-ZHU, Q.; FU-QIANG, W.; XIAO-YU, L. (set de 2011). Research on Online Monitoring Method for Longitudinal Rip of Steel-Core Belt. **Emerging Research in Artificial Intelligence and Computational Intelligence: International Conference, AICI**, p. 141-146, 2011.

VALE. **PROJETO FERRO CARAJÁS S11D**. Disponível em: <<http://www.vale.com/PT/initiatives/innovation/s11d/Documents/book-s11d-2013-pt.pdf>> Acesso em: 9 mar. 2017.

VELMURUGAN, G. et al. Conveyor Belt Troubles (Bulk Material Handling). **International Journal of Emerging Engineering Research and Technology**, v. 2, n. 3, p. 21-30, 2014.

VIKRAM, K.; MUKHOPADHYAY, P. Limestone Transportation by 17-km Cross-Border Long Belt Conveyor for Lafarge Surma Cement Limited. **Bulk Material Handling By Conveyor Belt 7**, p. 83-88, 2008.

VIOLA, P. A. Robust Real-Time Face Detection. **International Journal of Computer Vision (IJCV)**, v. 57, n. 2, p. 137-154, 2004.

WANG, C. Q.; ZHANG, J. The Research on the Monitoring System for Conveyor Belt Based on Pattern Recognition. **Intelligent System and Applied Material:Advanced Materials Research**, v. 466, p. 622-625, 2012.

WEN, W. et al. Defect Recognition of X-ray Steel Rope Cord Conveyor Belt Image Based on BP Neural Network. **International Symposium on Computer Science and Society**, p. 168-171, 2011.

WILLIAMS, L. Meeting the Requirements: Getting the Best from Conveyor Belts. **Bulk Solids Handling**, v. 31, n. 2, p. 160-162, 2011.

XING, F. A.; WAUH, J. Embedded Intelligent Sensor for Conveyor Belt-Fuzzy System Application. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 1, p. 1-6, 2011.

YANG, Y. et al. On-line conveyor belts inspection based on machine vision. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, v. 125, n. 19, p. 5803-5807, 2014.

YANG, Y. et al. On-line Longitudinal Rip Detection of Conveyor Belts Based on Machine Vision. **IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)**, p. 315-318, 2016.

YUAN, Y. et al. Research of Fault Diagnosis of Belt Conveyor Based on Fuzzy Neural Network. **The Open Mechanical Engineering Journal**, v. 8, p. 916-921, 2014.

ZHANG, S.; XIA, X. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems. **Applied Energy**, v. 87, p. 1929-1937, 2010.

ZHENG, Q. J. et al. A coupled FEM/DEM model for pipe conveyor systems: Analysis of the contact forces on belt. **Powder Technology**, 2016.