UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE

JOSÉ NEVES CRUZ

MONITORAMENTO DOS DESGASTES DE CORREIA TRANSPORTADORA UTILIZANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

JOÃO PESSOA
2018

JOSÉ NEVES CRUZ

MONITORAMENTO DOS DESGASTES DE CORREIA TRANSPORTADORA UTILIZANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como parte dos requisitos a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

JOÃO PESSOA
2018

Catalogação na publicação

Seção de Catologação e Classificação

C957m Cruz, José Neves.

Monitoramento dos desgastes de correia transportadora utilizando transdutores de ultrassônicos / José Neves Cruz. – João Pessoa, 2018.

61 f.

Orientação: Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva.
Coorientação: Dr. Euler Cássio Tavares de Macedo.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/Pós-Graduação.

1. Monitoramento, correia transportadora, transdutores. I. Villanueva, Dr. Juan Moises Villanueva. II. Macedo, Dr. Euler Cássio Tavares de Macedo. III. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

MONITORAMENTO DE DESGASTE DE CORREIA TRANSPORTADORA UTILIZANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

Elaborado por

JOSE NEVES CRUZ

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA (Presidente)

PROF. DR. EULER CASSIO TAVARES MACEDO

PROF. DR. CICERO DA ROCHA SOUTO

PROF. DR. JOSE MAURICIO RAMOS DE SOUZA

João Pessoa/PB, 27 de julho de 2018.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Rivaná, à minhas filhas Daniele e Milena e ao meu filho Jônatas pela compreesão nos momentos de ausência. Aos meus colegas professores do IFPE, professor Dr. Meuse Noguerira O. Junior, professor Dr. Moacir Martins Machado abriram espaço para desenvolver este trabalho e *in memoriam* ao professor MSc. Pedro Paulo, que nas viagens para Campina Grande era ministro da alimentação.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Juan Mauricio Villanueva que me aceitou para compor uma equipe de trabalho profissional voltado ao desenvolvimento de soluções industriais no ramo de correias transportadoras.

Dr. Euller que norteou este desafio possível e oferecido para o ramo industrial de esteiras transportadoras com correias transportadoras.

Aos funcionários técnicos da UFPB que cooperam para desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

Aos meus colegas de pós-graduação que tornaram um período de longa dedicação em algo divertido.

“EU FUI”

PEDRO PAULO MARQUES

RESUMO

As correias transportadoras de carga têm grande utilização para diversas aplicações, em transportes de pedras ou minérios. As correias transportadoras sofrem desgastes por abrasão, reduzindo-se o tempo de vida útil, em alguns casos de ruptura ocasionando acidentes ou parada da produção nos processos industriais. O monitoramento é um estudo dos elementos estatísticos para detectar a performance da correia transportadora no estado normal e anormal, que pode ser realizado utilizando técnicas baseadas em transdutores ultrassônicos, os quais tem a vantagem de ter resposta rápida, alta exatidão, robustez a meios com baixo SNR. Estes transdutores ultrassônicos quando instalados em posições estratégicas de medição permitem realizar o monitoramento continuo da correia transportadora. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de detecção de desgaste de correias transportadoras utilizando os transdutores ultrassônicos baseados na técnica de correlação cruzada, utilizando um cenário de laboratório composto por uma esteira transportadora acoplada a um motor trifásico e com cenários experimentais de medição de espessura da correia transportadora.
.

Palavras-chave: Monitoramento. Correia transportadora. Transdutores ultrassônicos. Tempo de trânsito. Desgastes.

ABSTRACT

The load conveyors have great use for various applications, in transport of stones or minerals. Conveyor belts are abraded by abrasion, reducing the service life, in some cases of rupture causing accidents or stop production in industrial processes. Monitoring is a study of the statistical elements to detect the performance of the normal and abnormal conveyor belt, which can be performed using techniques based on ultrasonic transducers, which has the advantage of having fast response, high accuracy and robustness to low SNR. These ultrasonic transducers, when installed in strategic measurement positions, enable continuous monitoring of the conveyor belt. In this work, a system of detection of wear of conveyor belts using the ultrasonic transducers based on the cross-correlation technique was developed, using a laboratory scenario composed of a conveyor belt coupled to a three-phase motor and with experimental scenarios of thickness measurement of the belt shipping company.

Keywords: Monitoring. Conveyor belt. Ultrasonic transducers. Time of flight. Wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Correia transportadora em mina de cobre. 12
FIGURA 2. Evolução de sinais de falha em equipamentos industriais 13
FIGURA 3. Tendências de desgaste da correia transportadora 14
FIGURA 4. Técnica de scaneamento a laser. 15
FIGURA 5. Teste termográfico em correia transportadora 16
FIGURA 6. Ensaio de ultrassom para medição de espessura. 17
FIGURA 7. Esquema do arranjo de transdutores ultrassônicos para o monitoramento de deslocamentos de esteiras 21
FIGURA 8. Medição de distânca de múltiplos objetos 21
FIGURA 9. Configuração dos transdutores ultrasônicos para medição da distância baseado no método do tempo de trânsito 23
FIGURA 10. Medição do TOF utilizando a técnica de detecção de limiar (TH) 24
FIGURA 11. Medição do TOF utilizando a técnica da diferença de fase (PD) 25
FIGURA 12. Sinal ultrasônico transmitido X e recebido Y 26
FIGURA 13. Operação de correlação R(X,Y) 26
FIGURA 14. Processo de aquisição de sinais de ultrassom 28
FIGURA 15. Pré-processamento do sinal ultrassônico para extrair a envoltória do sinal por meio da transformada de Hilbert 28
FIGURA 16. Estimação do TOF utilizando o filtro de Kalman 28
FIGURA 17. Componentes de uma correia utilizada em cargas de esforço médio 30
FIGURA 18. Correia para aplicações especiais 30
FIGURA 19. Correia transportadora utilizada com distâncias longas 32
FIGURA 20. Transporte de material calcário. 32
FIGURA 21. Rasgo longitudinal em uma correia transportadora 33
FIGURA 22. Método de detecção usando sensores magnéticos 36
FIGURA 23. Detecção de rasgos na correia transportadora usando RFID 36
FIGURA 24. Monitoramento de correias transportadoras por Raio-X 37
FIGURA 25. Inspeção de correias transportadoras usando câmeras 38
FIGURA 26. Medição de espessura de correias transportadoras usando ultrassom 38
FIGURA 27. Cofiguração de medição 40
FIGURA 28. Diagrama de blocos do setup de acionamento da correia transportadora 41
FIGURA 29. Dois tipos de desgastes utilizados para a determinação da espessura 42
FIGURA 30. Relógio comparador para caracterização dos desgastes 43
FIGURA 31. Resolução do relógio comparador 43
FIGURA 32. Caracterização do desgaste de 0,5 mm 44
FIGURA 33. Caracterização do desgaste de 2 mm 44
FIGURA 34. Resposta em frequência versus sensibilidade relativa (%) 45
FIGURA 35. Transdutor ultrassônico modelo TR40-10L. 46

FIGURA 36. Diagrama de blocos detalhando a funcionalidade da placa de condicionamento de sinal 46
FIGURA 37. Circuito para a transmissão de ondas de ultrassom (TX) 47
FIGURA 38. Circuito para a recepçao de ondas de ultrassom (RX) 47
FIGURA 39. Configuração do sistema de monitoramento de desgastes 47
FIGURA 40. Diagrama de fluxo do procedimento de monitoramento de correias 49
FIGURA 41. Configuração de medição 50
FIGURA 42. Geração do sinal para o transdutor ultrassônico 51
FIGURA 43. Sinais nos transdutores transmissor e receptor 51
FIGURA 44. Medição da distância entre os transdutores e a superficie 52
FIGURA 45. Medição da distância no ponto de referência 22 53
FIGURA 46. Polia do motor (D1, N1) e polia da esteira (D2, N2) 54
FIGURA 47. Medição da distância no ponto de referência 22. 55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Velocidades do ultrassom em diversos meios. 19
TABELA 2. Comparação entre as técnicas de estimação do tempo de trânsito 29
TABELA 3. Características das aplicações 31
TABELA 4. Especificações elétricas do transdutor TR40-10L 45
TABELA 5. Medições do TOF e da distância para os pontos 20, 22 E 24 52
TABELA 6. Medições do TOF e da distância para o ponto 22, com diferentes velocidades da esteira 55
TABELA 7. Medições para o terceiro cenário 56

SUMÁRIO

RESUMO VI
ABSTRACT VII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES VIII
LISTA DE TABELAS X
1 INTRODUÇÃO 12
1.1 OBJETIVOS 17
1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO 18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 18
2 REVISÃO DE LITERATURA 19
2.1 TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS 19
2.2 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA USANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS 20
2.3 TECNICAS DE ESTIMAÇÃO DO TOF 22
2.4 CARACTERISTICAS DAS CORREIAS TRANSPORTADORAS 29
2.5 DESGASTES DE CORREIAS TRANSPORTADORAS 33
2.6 INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE DESGASTES DE CORREIAS TRANSPORTADORAS 35
2.7 RESUMO DO CAPÍTULO 39
3 ESTIMAÇÃO DA ESPESSURA DA CORREIA TRANSPORTADORA 40
3.1 CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO 40
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DESGASTES NA CORREIA TRANSPORTADORA 42
3.3 CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA A TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE SINAIS DE ULTRASSOM 45
3.4 ALGORITMO PARA A ESTIMAÇÃO DA ESPESSURA 47
3.5 RESUMO DO CAPÍTULO 49
4 RESULTADOS 50
4.1 AQUISIÇÃO DOS SINAIS TRANSMITIDOS E RECEBIDOS 50
4.2 CENÁRIO 1: AQUISIÇÃO DE DADOS EM SUPERFICIE LISA 52
4.3 CENÁRIO 2: MEDIÇÃO LONGITUDINAL NO PONTO DE REFERÊNCIA 22 . 53
4.4 CENÁRIO 3: MEDIÇÃO DA ESPESSURA PARA O DESGASTE DE 0,5 MM . 55
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 57
REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

Correias transportadoras são máquinas utilizadas no transporte de materias e produtos em geral. Devido às suas inúmeras vantagens como: economia, segurança de operação, confiabilidade e versatilidade, são utilizadas em numerosos processos produtivos e industriais com o propósito de providenciar um fluxo contínuo de materiais com um menor impacto ambiental.

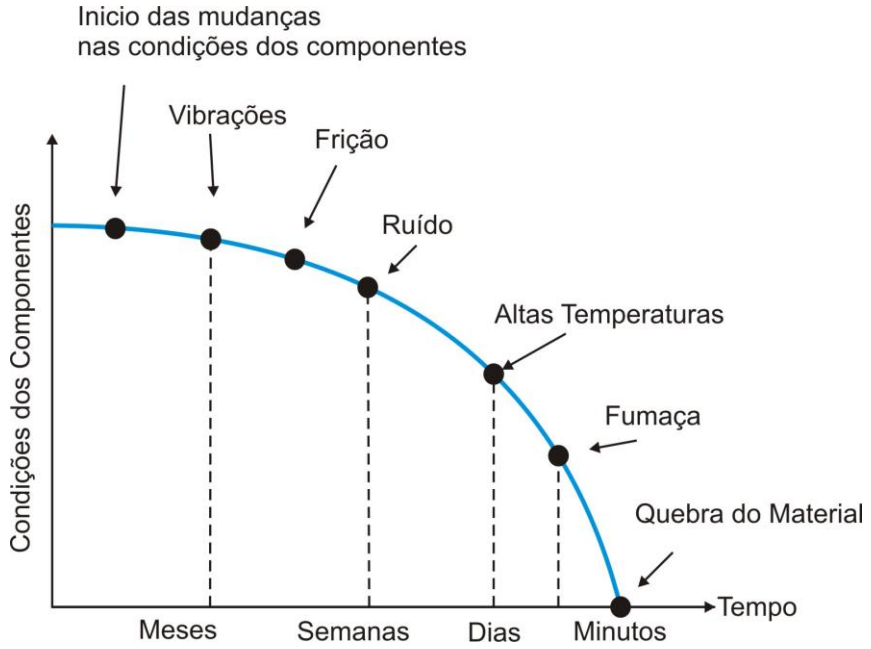
Especificamente, em aplicações de transporte de materias de mineração,como ilustrado na Figura 1., são utilizados correias transportadoras para o deslocamento de ferrosos e não ferrosos. Entretanto, paradas inesperadas nas correias transportadoras acarretam perdas consideráveis de energia e consequentemente perdas consideráveis na produção. As paradas do processo são devido principalmente a ruptura das correias transportadoras decorrentes dos desgaste não homogeneos e fadigas das correias. Estas ocorrências geram paradas não programadas do processo e consequentemente perdas financeiras. Complementarmente, desde um ponto de vista energetico, estas paradas ocasionam o decremento da produção e da eficência energética para o cumprimentos das metas da empresa (GOLDBECK, 2011).

FIGURA 1. Correia transportadora em mina de cobre.

Na Figura **2**2 são apresentados diferentes sinais de aviso de falhaque aparecem ao longo do tempo em equipamentos industriais. Normalmente, os sinais iniciais de falha aparecem na forma de vibrações fora da faixa esperada para

condições normais de operação. Essas vibrações podem ser detectados meses antes da ocorrência de uma falha que requer desligamento não programado. Semanas antes da ocorrência deste tipode falha aparecem ruídos audíveis fora dos limites de operação, devido à deterioração das peças rotativas e rolamentos. De semanas a dias antes do ocorrência de uma falha, já é possível detectar aumento de temperatura das peças mecânicas por meio do uso de sensores de temperatura e termografia. Deste ponto em diante, é altamente provável e iminente a ocorrência de uma falha grave. Como apresentado, através de uma seleção adequada do monitoramento da condição do sistema, é possível detectar sinais de possíveis falhas meses antes que um reparo seja necessário, permitindo a programação da manutenção. Consequentemente, as melhores práticas para manutenção de equipamentos críticos incentivam implementação de sistemas de monitoramento com de condições de soluções de testes não destrutivos na seguinte ordem: (i) monitoramento de vibração, (ii) monitoramento de ruído, e (iii) monitoramento de temperatura, (iv) inspeção visual (MORALES, 2017).

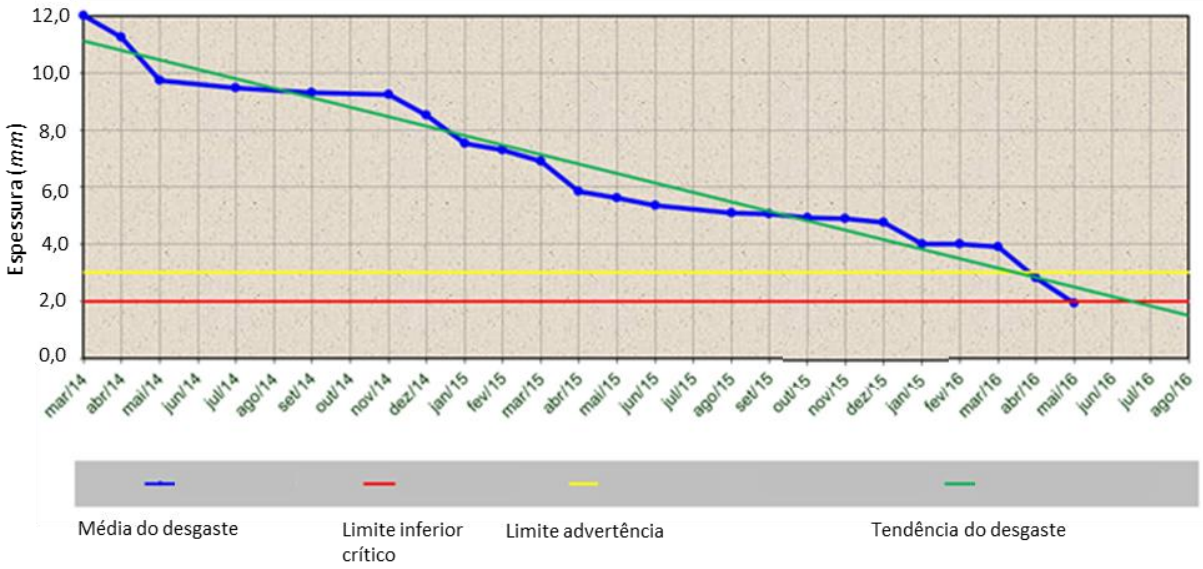
FIGURA 2. Evolução de sinais de falha em equipamentos industriais.



Com a finalidade de determinar o instante de substituição das correias transportadoras, é de interesse para o setor de processos industriais realizar a

inspeção e/ou monitoramento contínuo de desgaste de correias transportadoras. Com a finalidade de exemplificar este processo, na Figura 3, ilustra-se os pontos de medição de espessura de uma correia transportadora para um processo de mineração no dominio do tempo, iniciando o monitoramento no mês de março do ano 2014 e finalizando no mês e agosto de 2016, disponibilizada pela empresa de mineração Vale do Rio Doce. Nesta figura, a correia transportadora tem uma espessura inicial de 12 mm (linha em cor azul) e em um intervalo de 24 meses chegou atingir uma espessura de 4 mm (fevereiro de 2016), perto do estado crítico de ruptura da correia que é de 2 mm (linha em cor vermelha). A partir do historico das medições da espessura é determinada uma reta (linha de cor verde) cuja extensão no domínio do tempo indica a tendência do desgaste futuro, e portanto indica o instante no qual a correia transportadora atingiria uma espesura equivalente ao estado crítico. A tendência de desgaste mostra que no mês de junho de 2016 a correia transportadoraatingiráo estado crítico (espessura de 2 mm). Entretanto, a substituição da correia não é feita no instante em que atinge o estadocrítico,sendo antecipada para evitar paradas inesperadas e perdas na produção.

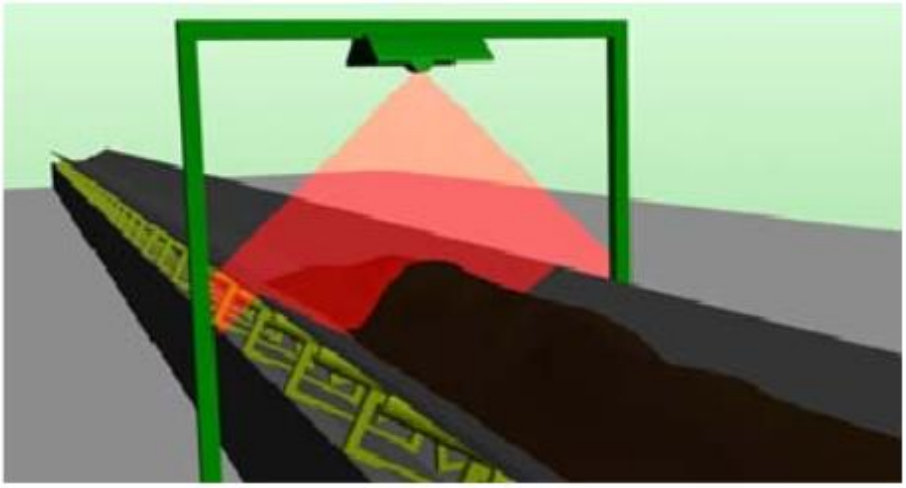
FIGURA 3. Tendências de desgaste da correia transportadora.



A inspeção dos desgastes nas correias transportadoras podem ser feitas usando tecnologias de medição baseadas em transdutores a laser, câmeras termográficas, trandutores ultrassom, entre outros.

O sistema de monitoramento a laser tem como princípio a medição da espessurados rasgos internosnas correias transportadoras, esta é realizada calculando o tempo que um pulso de laser (emitido pelo transmissor) demora prara ser refletido pelo objeto e detectado no receptor. Esse príncipio é conhecido como "tempo de vôo" que corresponde ao ToF (*Time-of-Flight*) e tem sido amplamente utilizado nas empresas de fabricação de pneus. Da mesma forma, a técnica de scaneamento a laser é usada para medição de volume de materiais sobre a esteira transportadora, como ilustrado na Figura4.

FIGURA 4. Técnica de scaneamento a laser.

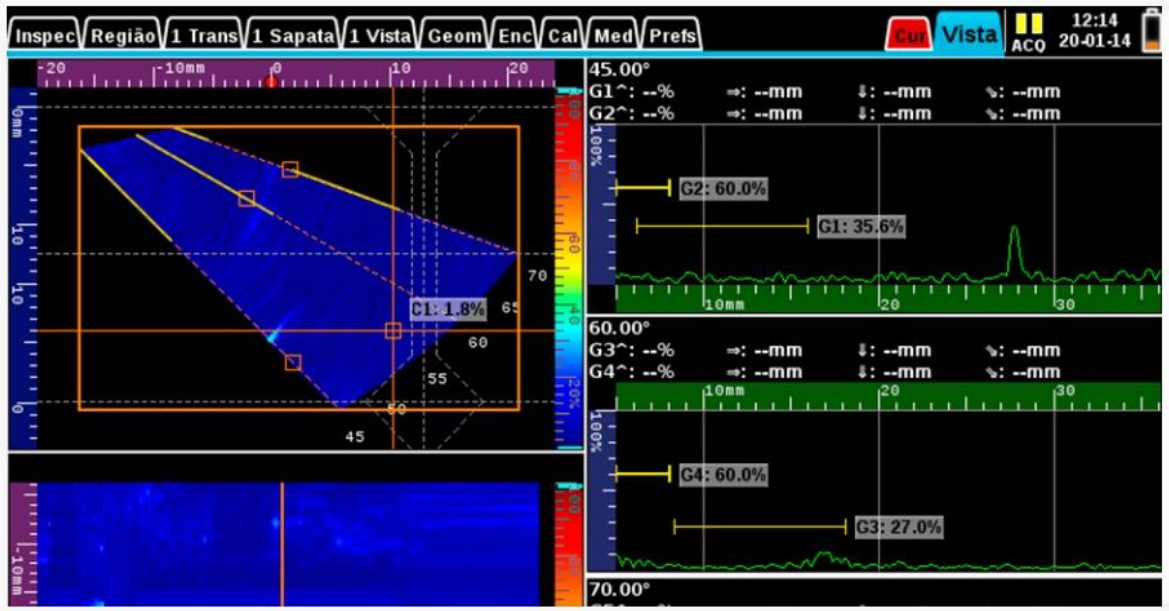


Entretanto, esta tecnologia possui limitações em ambientes críticos de operaçãoindustrial, como por exemplo, presença de chuva, respingo de materiais ferrosos, poera, altas temperaturas, etc. Estas características críticas de operação limitam a aplicabilidade da tecnologia a laser para a medição da espessura da correia transportadora em aplicações de transporte de minério e materias abrasivos.

Métodos tradicionais de monitoramento de correias transportadoras, tais como, a inspeção visual e a medição de temperatura possuem grandes dificuldades relacionadas à enorme carga de trabalho. Como solução alternativa pode-se utilizar o sistema de monitoramento com análise termográfica, o qual é baseado no mapeamento deondas de calor em diferentes locais da correia da transportadora, utilizando a aquisição pelo sensor infravermelho da imagem térmica dos elementos monitorados, sendo essa imagem é processada afim de se obter as características térmicas do elemento (YANG, 2016). Por meio deste procedimento pode-se relacionar

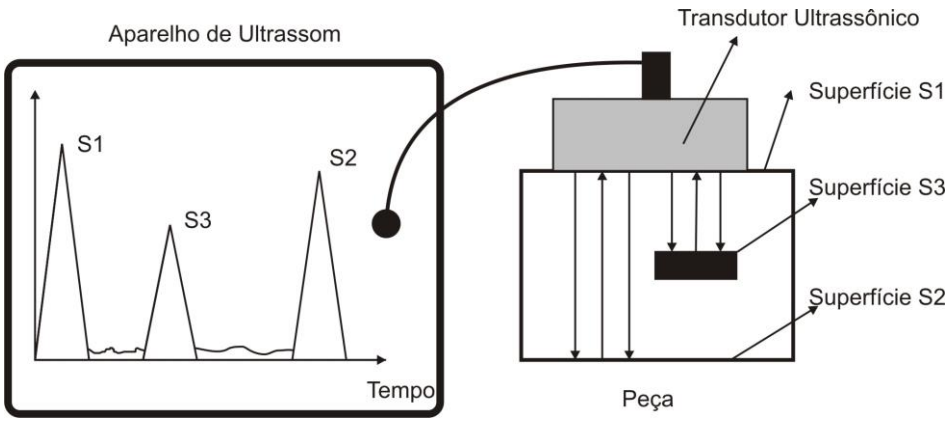
os pontos de maior temperatura com os locais de maior esforço mecânico em relação aos demais pontos na correia, Figura5.

FIGURA 5. Teste termográfico em correia transportadora.



O sistema de monitoramento de espessura de correias transportadoras por ultrassom utiliza transdutores, transmissor e receptor,baseado na análise do pulso eco. Na Figura6, ilustra-se o procedimento de medição da espessura para um material de teste, no qual é necessário o acoplamento do transdutor com o material. Nesta figura observa-se que são gerados pulsos-ecos (S1, S2 e S3) que determinam os tempos de voo (ToF, *Time-of-Flight*) da onda de ultrassom após a mudança de meio de medição. A diferença de tempo entre estes pulsos e o conhecimento da velocidade do som no material de teste são usados para estimar a espessura do material. Para este procedimento, conhecido como Ensaios Não Destrutivos (NDT, *Non-destructive Test*), é requerido a parada da operação do processo, para efetuar os ensaios e portanto, determinar a espessura das correias. Este procedimento, embora seja bastante utilizado, acarreta perdas de produção devido a as paradas programadas do processo.

FIGURA 6. Ensaio de ultrassom para medição de espessura.



Neste cenário, e com a finalidade de introduzir melhorias no processo de medição de espessura em correias transportadoras que diminua os tempos de parada para realizar as medições, neste trabalho de dissertação foi desenvolvido um sistema de monitoramento contínuo da espessura de correia transportadora utilizando transdutores ultrassônicos sem contato com a correia, isto é, sem acoplamento. Para este propósito, foi construído uma bancada de ensaios com um protótipo de esteira composta por uma correia transportadora de 4 mm de espessura. A técnica de medição da espessura é realizada utilizando transdutores ultrassônicos e utilizando o princípio de estimação do tempo de trânsito (ToF, *Time-of-Flight*) para a estimação da espessura da correia transportadora.

1.1 OBJETIVOS

Geral:

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento do desgaste de correias transportadoras utilizando transdutores ultrassônicos.

Especificos:

- Caracterização dos diferentes tipos de desgastes nas correias transpostadoras;
- Verificação do uso de transdutores ultrassônicos para a estimação da espessura de correias sem contato com a correia transportadora;

- Aplicação da técnica de correlação cruzada para a estimação do tempo de trânsito (ToF, *Time-of-Flight*).

1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

- Desenvolvimento de uma bancada de teste para a estimação da espessura de correias transportadoras;
- Desenvolvimento de circuitos de condicionamento para a transmissão e recepção de sinais de ultrassom;
- Aplicação da técnica de correlação cruzada para a estimação indireta da espessura por meio da estimação do tempo de trânsito ultrassônico (ToF, *Time-of-Flight*);
- Estimação da espessura de correias transportadoras usando transdutores ultrassônicos de baixo custo com uma resolução de 0,5 mm.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capitulo, este trabalho está composto por mais quatro capitulos, os quais são sucintamente explicados a continuação:

No Capítulo 2 é feito uma revisão bibliográfica com os principais assuntos que serviram de base para o desenvolvimento do projeto.

No Capítulo 3 é feito uma descrição detalhada da configuração de medição e o algoritmo de estimação da espessura.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados do trabalho, por meio da coleta de dados em uma bancada de teste.

No Capítulo 5 são apresentados as conclusões e trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão apresentados os fundamentos e definições preliminares sobre transdutores ultrassônicos, medição de distância, conceitos associados a desgastes de correias transportadoras, assim como as principais técnicas usadas para a estimação de desgastes.

2.1 TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

As ondas ultrassônicas são geradas por transdutores ultrassônicos. De uma forma geral, um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Os transdutores ultrassônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores são feitos de materiais piezoelétricos. Certos cristais naturais como o quartzo e a turmalina são piezoelétricos. Outros se tornam artificialmente como o sulfato de lítio, o titanato de bário e o titanato de zirconato de chumbo (PZT).

As ondas de ultrassom, em geral, se propagam através de líquidos, tecidos e sólidos. Apresentam velocidades de propagação compatíveis com diferentes meios, sendo essa característica inerente ao processo de interação das ondas de ultrassom (mecânicas) com o meio em particular. Na Tabela 1, pode-se verificar as diferentes velocidades de propagação das ondas de ultrassom nos diversos meios.

TABELA 1. Velocidades do ultrassom em diversos meios.

Meios de propagação	**Velocidade de propagação (m/s)**
Ar	330
Água	1480
Gordura	1460
Músculo	1620
Tecidos moles	1540
Fígado	1555
Sangue	1560
Osso	4080

Por se tratar de uma onda, o ultrassom sofre reflexão e refração nas interfaces onde ocorre uma mudança na densidade, assim como no caso da luz. O ultrassom ao se propagar em um meio e ao passar de um meio para outro, sempre sofre atenuação da intensidade do sinal, devido aos efeitos de absorção, reflexão e espalhamento.

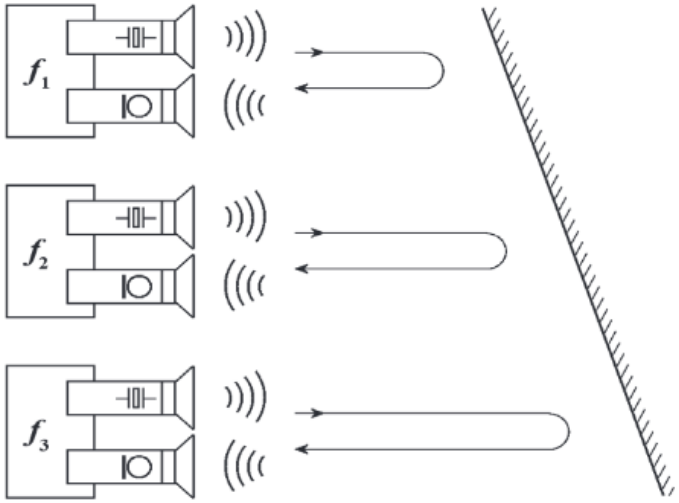
Cada transdutor possui uma freqüência de ressonância natural, tal que quanto menor a espessura do cristal, maior será sua freqüência de vibração. Dependendo da aplicação, o elemento piezoelétrico é quem determina a frequência de operação do transdutor. Em geral os transdutores são acondicionados em um suporte plástico para lhes dar proteção mecânica e elétrica. Na superfície por onde emergem, as ondas ultrassônicas têm uma camada especial para permitir o perfeito acoplamento acústico e também para dar proteção ao elemento piezoelétrico.

2.2 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA USANDO TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS

O método de pulso eco é baseado na estimação da diferença de tempo entre o eco do pulso de ultrassom transmitido ate a detecção do pulso eco no transdutor receptor. Esta diferença de tempo é chamada de tempo de trânsito (ToF – *Time ofFlight*) e é um dos métodos clássicos para a medição de distância por ultrassom e usualmente é implementada utilizando uma técnica de detecção de limiar. Embora seja uma técnica simples de ser implementada, a técnica de limiar apresenta limitações em ambientes com altos níveis de ruído. Assim, diversos trabalhos desenvolveram técnicas de estimação do ToF baseados em processamento digital de sinais, técnicas estatísticas e baseadas em inteligência artificial para o aprimoramento a estimação do ToF considerando aspectos de alto nível de ruído. Entre as abordagens atuais encontram-se o uso de técnicas de modulação por varredura de frequência (*frequency sweep*) ou codificação por sequências pseudoaleatórias e Correlação cruzada entre o eco do sinal transmitido e o eco refletido (HITARA, 2017).

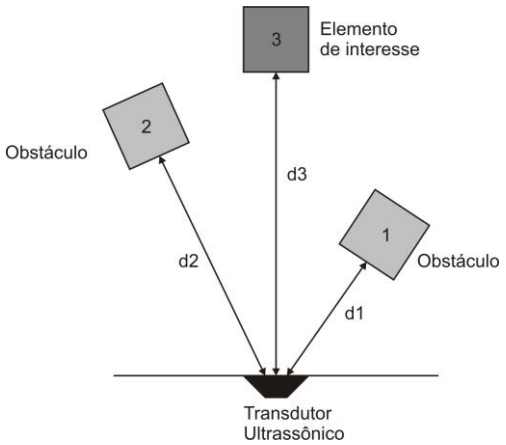
Em Tianyu (2017) foi utilizado um arranjo de pares transdutor/receptor ultrassônico para a medição da distância de uma esteira em vários pontos de sua estrutura, como ilustrado na Figura 7. A finalidade desta configuração de medição consiste em determinar se existe ou não deslocamento da esteira, e habilitar uma alerta quando existir um iminente movimento da estrutura, desta maneira aumenta-se a segurança na operação e uso deste tipo de equipamentos.

FIGURA 7. Esquema do arranjo de transdutores ultrassônicos para o monitoramento de deslocamentos de esteiras.



Usualmente, os transdutores ultrassônicos são usados para medir distância na direção do feixe com maior ganho de potência. Entretanto, estas configurações apresentam limitações quando existem objetos próximos do elemento de objeto de estudo, como ilustrado na Figura 8, devido principalmente a presença de aos ecos e aumento da atenuação do meio. Em Kredba (2017) foi desenvolvido uma metodologia para medir a distância de multiplos objetos utilizando transdutores ultrassônicos, baseadas nas técnicas de processamento de sinais, principalmente filtros digitais, correlação cruzada e métodos de diferença de fase, conseguindo medir distâncias de ate 3 m e com uma resolução de 1 mm.

FIGURA 8. Medição de distânca de múltiplos objetos.



A estimação do ToF pode ser aprimorada utilizando-se métodos híbridos como as técnicas de correlação e a técnica de diferença de fase entre o transmissor e receptor (KHYAM, 2017). Entretando, a implementação desta técnica requer o uso de hardware especifico além da otimização dos algoritmos e do alto custo computacional. Em Naba (2015) foi desenvolvido um novo método de medição da distância utilizando a técnica hibrida baseada na detecção de limiar (*threshold*) e correlação cruzada. A técnica de limiar realiza a detecção do eco no transdutor receptor ultrassônico e o método de correlação aprimora a estimação do ToF com poucas amostras, aprimorando-se assim, o custo computacional e a necessidade de hardware específicos para processamento de sinais. Neste trabalho foram realizadas as medições usando transdutores ultrassônicos com frequência de operação de 40 kHz e frequência de amostragem de 500 kamostras/s, obtendo-se resultados com uma resolução de 0.5 mm com um erro relativo médio de 2%.

De outro lado, a medição de distância baseado transdutores ultrassônicos requerem realizar a medição da velocidade do som. Entretanto as variações não uniformes da temperatura alteram a velocidade do som e, portanto, aumentam a incerteza da medição da distância, limitando o uso de transdutores ultrassônicos para pequenas distâncias, como estudado em (WYER, 2017).

2.3 TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DO TOF

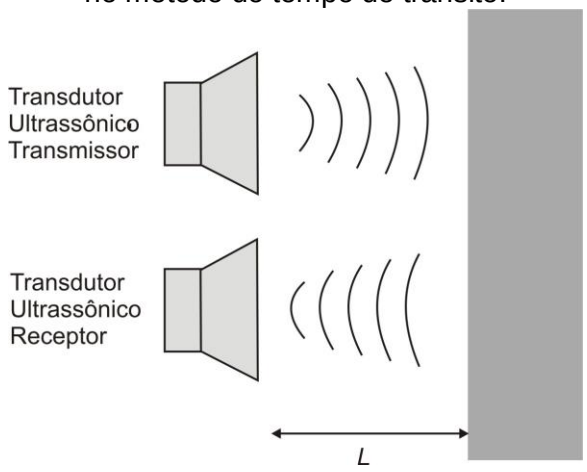
O método do Tempo de Trânsito (ToF, *Time-of-Flight*) baseia-se na medição do tempo de propagação de um sinal de ultrassom entre um transdutor transmissor emissor T_A e um transdutor receptor T_B, alinhados com um ângulo especificado à direção do vento, como ilustrado na Figura 9. Este tempo de propagação da onda de ultrassom é definido como o Tempo de Trânsito e é utilizado para a determinação da distância, mediante as expressões que relacionam os tempos de propagação dos sinais de ultrassom com avelocidade do som na qual se propaga a onda de ultrassom, neste caso ar livre (PÀLLAS-ARENY, 2001).

$$L = \frac{ToF \times C}{2} \tag{2.1}$$

Em que: *L* é a distância entre os transdutores e a superfície refletora, *C* é a velocidade do som e *ToF* é o tempo de trânsito. A dependência de C com a temperatura T_K (em Kelvin) é dada por (KAIMAL, 1963):

$$C = 20.074\sqrt{T_K} \tag{2.2}$$

FIGURA 9. Configuração dos transdutores ultrasônicos para medição da distância baseado no método do tempo de trânsito.



Para o propósito de medição do Tempo de Trânsito (ToF), apresentam-se sucintamente, nesta seção, as principais técnicas encontradas nas referências (VILLANUEVA, 2009) e (COSTA, 2013):

A. Detecção de Limiar

B. Diferença de Fase

C. Correlação Cruzada

D. Filtro de Kalman

A. Detecção de Limiar

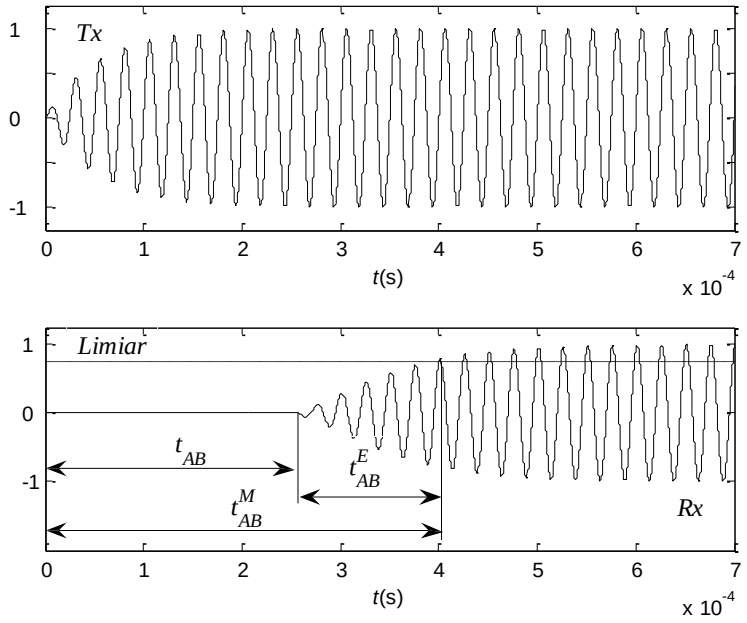
Considerando-se a configuração dos transdutores ultrassônicos da Figura 10 realiza-se a medição do ToF utilizando-se de técnica de Detecção de Limiar (TH – *Threshold Detection*). Este método consiste em transmitir um trem de ondas senoidais a partir do transdutor transmissor e medir o tempo necessário para sua detecção (ToF) no transdutor receptor, através da detecção de um nível de referência ou limiar, como ilustrado na Figura10. Entretanto, devido ao retardo imposto pela dinâmica dos

transdutores, o valor medido do ToF (t_{AB}^{M}) não corresponde diretamente ao tempo de recepção. Conseqüentemente, o valor medido do tempo pode ser expresso como a soma do tempo de transmissão (t_{AB}) com o tempo de detecção (t_{AB}^{E}):

$$t_{AB}^{M} = t_{AB} + t_{AB}^{E} \tag{2.3}$$

Uma aferição pode ser realizada de forma a determinar o tempo de detecção (t_{AB}^{E}) para uma distância de calibração.

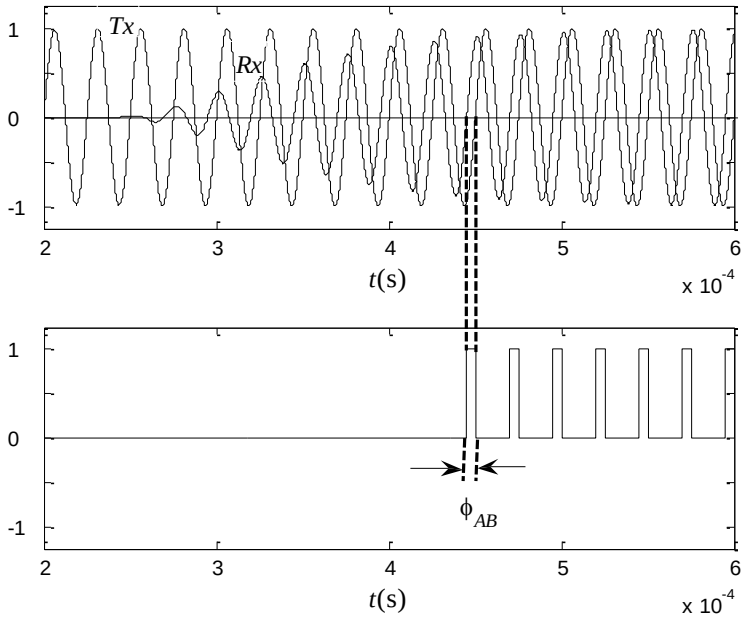
FIGURA10. Medição do tof utilizando a técnica de detecção de limiar (TH).



B. Diferença de Fase

Para a configuração dos transdutores ultrassônicos da Figura 11, a técnica da Diferença de Fase trabalha medindo a diferença de fase entre as ondas ultrassônicas transmitidas e recebidas, como ilustrado na Figura12. Para uma freqüência de operação dos transdutores f, a fase instantânea no transmissor e receptor pode ser encontrada por $\phi_{AB} = 2\pi.f.ToF$. Isto é, o ToF pode ser estimado indiretamente a partir da medição da diferença de fase.

FIGURA 11. Medição do tof utilizando a técnica da diferença de fase (PD).



C. Técnicas de Correlação

A correlação cruzada é uma operação entre dois sinais discretas com a finalidade de avaliar a similaridade que existe entre elas, por meio da extração de informações das mesmas. Neste caso, a informação de interesse é a estimação do tempo do trânsito (ToF). Para este propósito, consideram-se duas seqüências digitais x(n) e y(n) que se deseja comparar, em que x(n) representa as amostras do sinal transmitido e y(n), as amostras do sinal no receptor. O sinal recebido apresenta um retardo temporal em relação ao sinal transmitido e é representado por:

$$y(n) = Ax(n-\tau) + w(n) \tag{2.4}$$

Em que A é o fator de atenuação devido à trajetória do sinal transmitido x(n) através do meio de propagação, τéo retardo devido ao trajeto desde o transmissor até o receptor (ToF) e w(n) representa o ruído aditivo captado no transdutor receptor e qualquer outra componente de ruído gerada pelos componentes eletrônicos e amplificadores do receptor. Na Figura12 ilustra-se os sinais elétricos do eco de ultrassom transmitido e recebido.

Considerando-se as sequências de transmissão e recepção, o problema consiste em determinar o atraso de tempo τ e, a partir deste resultado, a estimação da distância (*L*). Para este propósito, utiliza-se a operação de correlação entre os

sinais x(n) e y(n), em que o índice da posição do valor máximo do resultado da operação de correlação é relacionado à medição do tempo de trânsito τ, como se ilustra na Figura13 (PROAKIS, 1995). A correlação de duas sequências é definida pela seguinte relação:

$$R(x,y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)y(n+k) \tag{2.5}$$

FIGURA12. Sinal ultrasônico transmitido X e recebido Y.

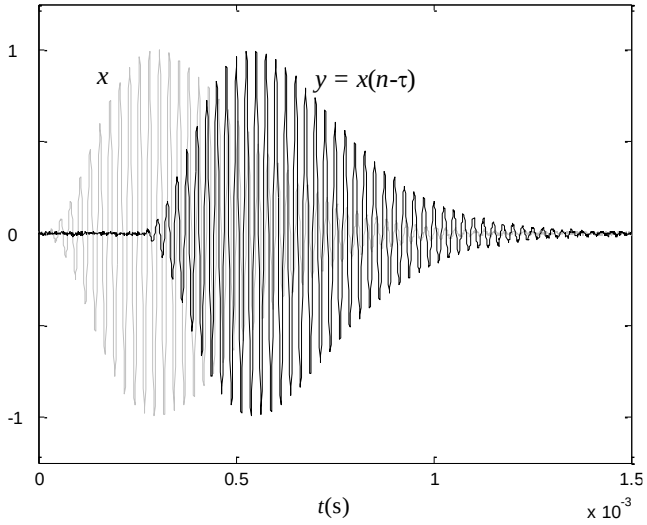
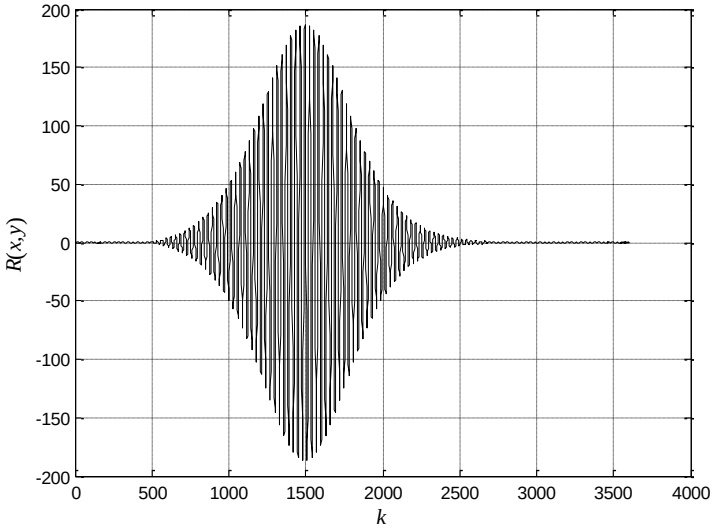


FIGURA 13. Operação de correlação R(X,Y).



D. Filtro de Kalman

Outro método utilizado para estimação do Tempo de Trânsito (ToF) é baseado no Filtro de Kalman. Para este propósito, realiza-se a modelagem matemática da envoltória do sinal de ultrassom recebido no transdutor receptor. A partir disto, utiliza-se o procedimento recursivo do Filtro de Kalman para a estimação de estados do conjunto de parâmetros que caracterizam a envoltória. Deste modo, a equação da envoltória é dada por (ANGRISANI, 2006):

$$A(t) = A_0 \left(\frac{t-\tau}{T} \right)^{\alpha} \exp\left(\frac{t-\tau}{T} \right) \tag{2.6}$$

em que A_0 é a amplitude do sinal ultra-sônico, α e T são parâmetros específicos do transdutor ultrassônico e τ é o tempo de trânsito (ToF).

O procedimento de medição do ToF baseado no Filtro de Kalman consiste nas seguintes etapas:

Aquisição de dados: O primeiro passo deste procedimento consiste em realizar a conversão análogo-digital do sinal de ultrassom, por meio de um sistema de aquisição de dados, como apresentado na Figura 14.

Pré-processamento de sinais: Devido ao procedimento utilizar a envoltória do sinal de ultrassom, operações de pré-processamento são requeridas. Para tal, calcula-se o módulo analítico (valor absoluto) do sinal de ultrassom e extrai-se a envoltória deste último sinal por meio da Transformada Hilbert, como apresentado na Figura15.

Estimação de parâmetros: Para a estimação dos parâmetros (A_0, α, T e τ), devem ser inicialmente estabelecidos os intervalos de variação e suas variâncias. Executa-se, a seguir, o procedimento recursivo baseado no Filtro de Kalman, determinando-se os parâmetros da envoltória definida em (6), entre eles o tempo de transito τ (ToF), como ilustrado na Figura16.

FIGURA 14. Processo de aquisição de sinais de ultrassom.

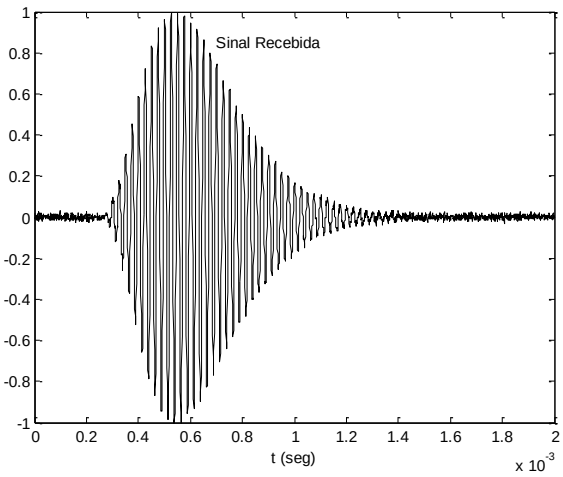


FIGURA 15. Pré-processamento do sinal ultrassônico para extrair a envoltória do sinal por meio da transformada de Hilbert.

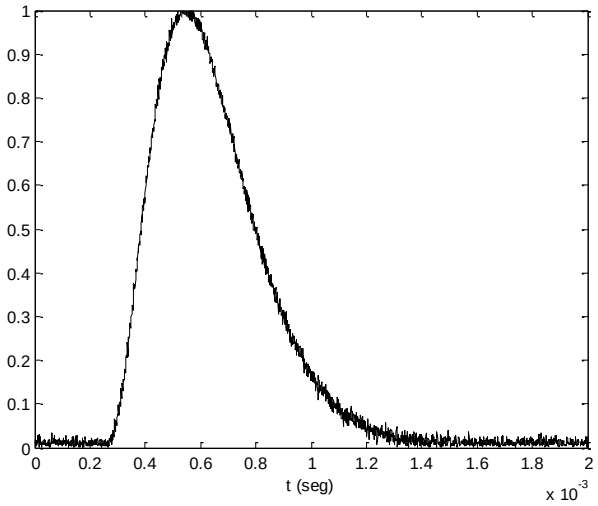
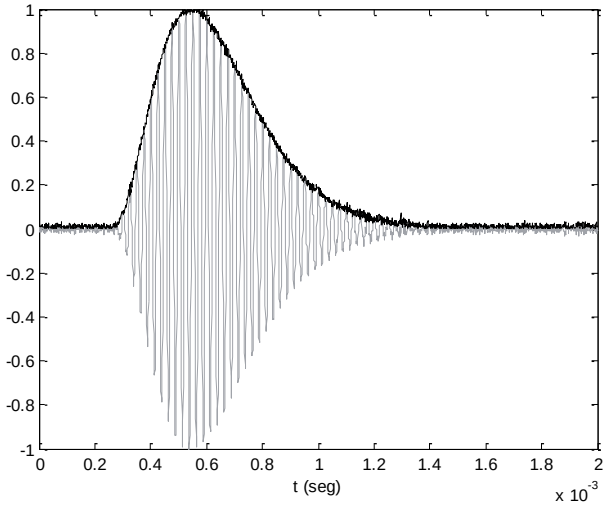


FIGURA 16. Estimação do tof utilizando o filtro de Kalman.



Comparação dos Métodos de Tempo de Trânsito

Com a finalidade de realizar a comparação dos métodos doTempo de Trânsito apresentados na seção anterior, na Tabela2 apresenta-se uma descrição resumida entre eles, levando em consideraçãoos seguintes parâmetros: processamento computacional e influência das incertezas.

TABELA 2. Comparação entre as técnicas de estimação do tempo de trânsito.

Método	Processamento	Incertezas
Detecção de Limiar	Detecção do sinal a partir de um nível de limiar predefinido.	Influências na medição da temperatura e na detecção do limiar.
Diferença de Fase	Medição da diferença de fase entre as ondas transmitida e recebida.	Influências na medição da temperatura e na medição da diferença de fase.
Correlação Cruzada	Estimação da Correlação Cruzada utilizando técnicas de processamento de sinais.	Incertezas introduzidas devido as aproximações das técnicas de interpolação.
Filtro de Kalman	Estimação de parâmetros de forma recursiva e uso de técnicas de processamento de sinais.	Incertezas na estimação dos parâmetros.

2.4 CARACTERÍSTICAS DAS CORREIAS TRANSPORTADORAS

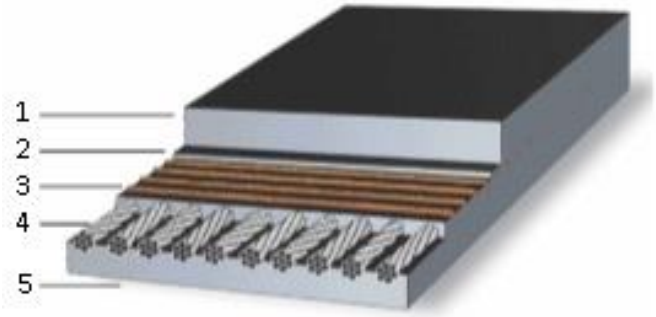
Existem no mercado vários tipos de correias transportadoras para diversas aplicações em setores tais como mineração, pedreiras e transportes logisticos, portanto para cada tipo serviço recomenda-se o adequado tipo de correia transportadora para aplicações específicas.

As correias transportadoras utilizadas em aplicações que exigem um esforço médio de carga possuem características semelhantes à correia apresentada na Figura 17. As componentes deste tipo de correias são: 1) Cobertura Superior de Borracha; 2) Lona Têxtil; 3) Camada de Borracha (*SkinCoat*); e 4) Cobertura Inferior de Borracha.

FIGURA 17. Componentes de uma correia utilizada em cargas de esforço médio.

Já correias para aplicações especias em materiais abrasivos, requerem muito esforço de tração mecânica transversal e longitudinal, como ilustrado na Figura18. As componentes deste tipo de correias são: 1) Cobertura Superior de Borracha; 2) Camada de Borracha de Ligação; 3) Cordoalhas Sintéticas; 4) Elementos de Tensão (Cabos de Aço); e 5) Cobertura Inferior de Borracha.

FIGURA 18. Correia para aplicações especiais.



O elemento de tensão (lona têxtil) é a seção estrutural mais importante da correia, uma vez que tem como objetivo transmitir a tensão necessária para elevar e mover a correia carregada e absorver a energia de impacto liberada pelo material ao ser carregado na correia. Ela deve permitir a aplicação de adequadas técnicas de emenda e ser robusta suficiente para lidar com forças que ocorrem ao se iniciar, movimentar e parar a correia carregada. A lona têxtil também fornece a rigidez

necessária à correia para que permaneça alinhada e suporte a carga (VELOSO, 2014).

As coberturas protegem a carcaça da abrasão causada pelo carregamento ou qualquer outra condição que possa contribuir para a deterioração da correia. O tamanho dos blocos, tipo e quantidade de material, velocidade e outras condições operacionais requerem coberturas de diferentes graus de resistência a cortes, sulcos, rasgos, abrasão e umidade. Em determinados casos especiais, a cobertura e até mesmo a carcaça devem resistir também ao ataque de óleo, graxas, ácidos, temperatura, fogo etc. (VELOSO, 2014).

A 3 apresenta uma relação direta entre as características dos materiais transportados e as espessuras das correias transportadoras do fabricante Borcap, do tipo Extrabelt. Portanto, cada aplicação requer um estudo de dimensionamento das estruturas físicas dos materiais e componentes das correias transportadoras.

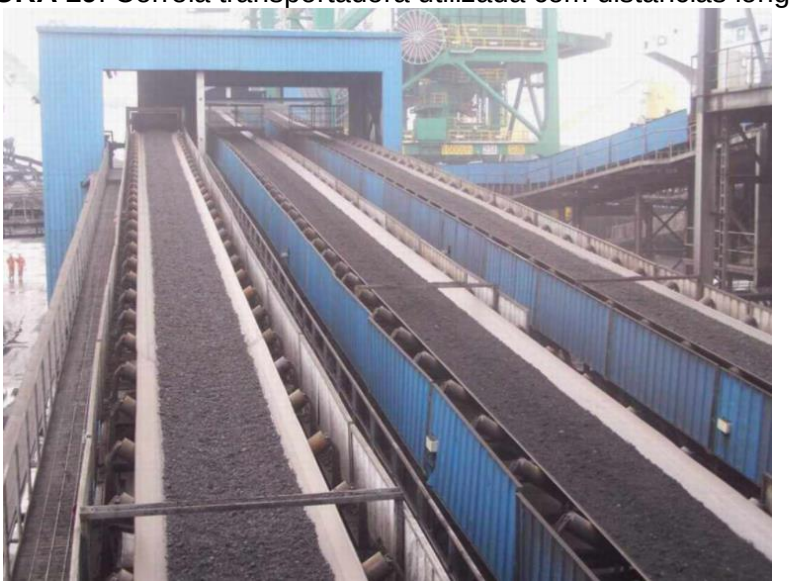
TABELA 3. Características das aplicações.

COBERTURA SUPERIOR		CICLO DA CORREIA (min)			COBERTURA INFERIOR	
		ATÉ 0,5	DE 0,5 A 1,0	ACIMA DE 1,0		
MATERIAL TRANSPORTADO	GRANULOMETRIA (mm)	ESPESSURA DA COBERTURA (mm)			LARGURA DA CORREIA (mm)	ESPESSURA INDICADA (mm)
MUITO ABRASIVOS Ex.: Minério de Ferro - Clinquer Cavaco de Vidro - Granito Quartzo - Manganês - etc.	Até 25	3,0 a 10,0	3,0 a 8,0	3,0 a 6,0	ACIMA DE 1050	2,0 a 4,0
	De 25 a 125	3,0 a 12,0	3,0 a 10,0	3,0 a 8,0		
	Acima de 125	6,0 a 14,0	6,0 a 14,0	6,0 a 12,0		
ABRASIVOS Ex.: Sinter - Escória - Calcário Coque - Bauxita - Pellets Minério de Cobre - etc.	Até 25	3,0 a 8,0	3,0 a 6,0	2,0 a 4,0	DE 600 A 1050	1,5 a 3,0
	De 25 a 125	3,0 a 10,0	3,0 a 7,0	3,0 a 6,0		
	Acima de 125	5,0 a 10,0	5,0 a 10,0	3,0 a 8,0		
POUCO ABRASIVOS Ex.: Carvão - Cascalho Cereais - Cal - Sal Areia - Terra - etc.	Até 25	1,5 a 5,0	1,5 a 4,0	1,5 a 3,0	ATÉ 600	1,0 a 1,5
	De 25 a 125	3,0 a 6,0	3,0 a 5,0	1,5 a 5,0		
	Acima de 125	3,0 a 8,0	3,0 a 6,0	2,0 a 6,0		

OBS.: Para informações sobre as coberturas das correias tipo AT e TSH, consulte nosso departamento técnico.

A correia transportadora é um dos equipamentos mais importantes na mineração industrial, em algumas aplicações, é utilizada no transporte de materiais abrasivos a longas distâncias, como ilustrado na Figura 19.

FIGURA 19. Correia transportadora utilizada com distâncias longas.



A Figura 20 exemplifica uma aplicação de uma esteira transportadora terrestre transportanto material calcário.

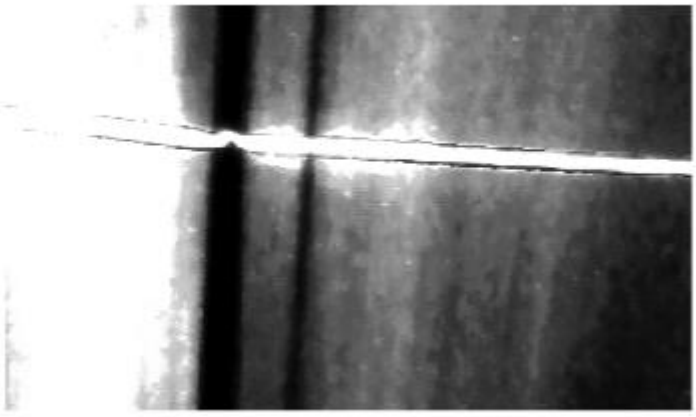
FIGURA 20. Transporte de material calcário.

2.5 DESGASTES DE CORREIAS TRANSPORTADORAS

A condição de operação de uma correia transportadora pode afetar diretamente a segurança de toda a produção. Os tipos de estresse, que uma correia transportadora deve suportar sobre condições extremas sem dano, são vários. Maior vida útil e maior força transversal são desafios econômicos e ecológicos.

No setor da mineração industrial, devido ao trabalho em um ambiente complexo podem ocorrer danos às correias transportadoras provocados por materiais cortantes e perfurantes. Estes materiais provocam um tipo de desgaste conhecido tecnicamente por rasgos longitudinais ou popularmente por lágrima, como mostrado na Figura 21, portanto é um dos defeitos mais graves que pode ocorrer com uma correia transportadora, geralmente ocorre perto dos pontos de transporte do material, o que pode causar perdas econômicas consideráveis, devido à quantidade substancial de material desperdiçado durante o transporte.

FIGURA 21. Rasgo longitudinal em uma correia transportadora.



Outro defeito grave que pode ocorrer com uma esteira transportadora é ruptura severa (lágrimas), na qual uma parte da correia pode ser descamada e chicotada constantemente, aumentando a vulnerablidade da segurança dos operadores que trabalham. Desta manerira, a área de segurança do trabalho constantemente executa ações para prevenir a ocorrência de rasgo longitudinal e impedir o aumento adicional de rasgos existentes.

A correia é um componente sujeito a trocas periódicas. Na correia ideal, o desgaste total da cobertura superior deveria coincidir com o fim da vida útil, mas normalmente a cobertura superior se desgasta primeiro. Os danos que ocorrem nas correias podem ser divididos em duas grandes classes: desgaste normal e danos evitáveis. O desgaste normal faz parte da rotina de operação de uma planta, sendo incorporado ao planejamento da mesma; os danos evitáveis podem e devem ser minimizados através de ações diversas que dependem da real situação de operação do equipamento. Os principais tipos de danos de correias podem ser classificados conforme descrito a seguir:

- *Danos por impacto:* causados por materiais grandes e afiados que atingem a cobertura superior, provocando arranhões e cortes aleatórios. Em certas situações, dependendo da severidade do impacto, pode ocorrer o corte de toda a correia.
- *Danos por material preso:* geralmente ocorrem em função de material que fica preso nos sistemas de vedação de correia (guias), que provocam uma compressão do material contra a correia, causando cortes ou abrasão em sua superfície.
- *Danos na extremidade da correia:* são caracterizados pelas extremidades desgastadas em um ou ambos os lados e são provocados pelo desalinhamento da correia na estrutura.
- *Delaminação da correia:* ocorre quando as camadas das coberturas superior e inferior se separam. Pode ser provocada pelo tamanho dos tambores abaixo do recomendado, entrada de umidade, de produtos químicos e outros materiais alheios na extremidade da correia.
- *Cobertura superior desgastada:* tais danos são identificados quando a cobertura é desgastada em toda sua superfície superior ou área de carregamento. Uma das causas é abrasão causada pelo carregamento do material, que ocorre em função da ação abrasiva ou tritutrante sobre a cobertura da correia, criada pela queda do material na correia em movimento.
- *Rasgos e sulcos por objetos estranhos:* são danos provocados pela queda de materiais como pedaços de chapas, tubos metálicos, blocos de concreto e outros que podem ficar presos na estrutura de transportador causando cortes na correia.

Apesar de não serem tão frequentes, geralemente são muito difíceis de controlar, pois costumam ser instantâneos.

- *Danos pelo limpador de correias:* sistemas de limpeza são necessários para remover acúmulos de material e reduzir a quantidade de material fugitivo, auxiliando na preservação da correia. Entretanto, estes sistemas têm efeitos negativos, podendo danificar a correia, principalmente se forem mal aplicados ou mantidos.
- *Rachadura na cobertura superior:* são pequenas rachaduras na cobertura superior, perpediculares à direção de movimento da correia. Podem ser causadas por incompatibilidade entre a correia e o diâmetro dos tambores.
- *Falhas de emendas:* é a parte mais fraca de uma correia transportadora, sendo sua falha a mais crítica em termos de longos períodos de parada. É usualmente causada pela concentração de esforços que ocorre naquela região.
- *Envergadura da correia:* ocorre quando a correia tem uma curvatura permanente através de sua face, perpendicular à sua direção de movimento. Acontecem em função de calor, pontos de transição incompatíveis, por ângulo de concavidade muito severo ou por sobretensionamento na correia.
- *Curvatura da correia:* dano caracterizado por uma curvatura ao longitudinal na correia, quando vista do topo. Pode ser causado por falha durante a fabricação, devido armazenamento incorreto ou tensionamento inadequado. A curvatura provoca desalinhamento na correia.

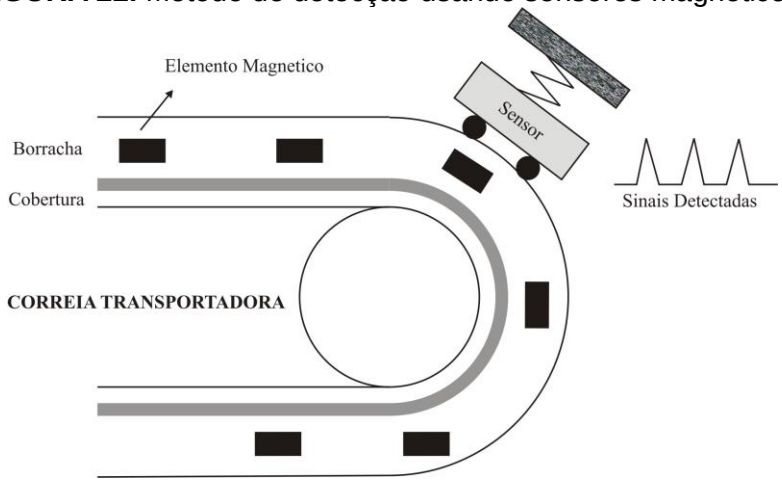
2.6 INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE DESGASTES DE CORREIAS TRANSPORTADORAS

Geralmente as correias transportadoras usadas em aplicações de mineração são propensas a falhas durante a operação, ou quebra da correia de maneira inesperada trazendotrazendo sérios problemas na segurança da produção, além da parada da produção e perdas financeiras por parte da empresa. Desta maneira sistemas de monitoramento da condição operacional de correias transportadoras tornam-se excelente ferramentas de tomada de decisões para a manutenção e ou planejamento de troca de correias nos processos produtivos (YANLI, 2014).

Entre os sistemas de monitoramento de correias transportadoras para a detecção de desgastes estão:

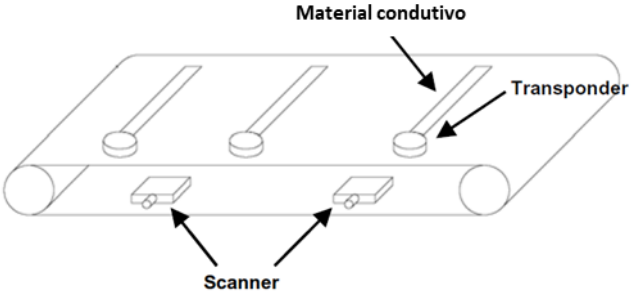
- *Método de detecção usando sensores eletromagnéticos* (PANG, 2006): utiliza uma matriz de elementos magnéticos incorporados na carcaça da correia transportadora e sensores externos para detectar e monitorar os parâmetros da correria transportadora, como se ilustra na Figura 22. O elemento sensor é pressionado por uma mola contra a superfície da correia. A detecção de desgaste é realizada de acordo com o deslocamento da mola e do sensor.

FIGURA 22. Método de detecção usando sensores magnéticos.



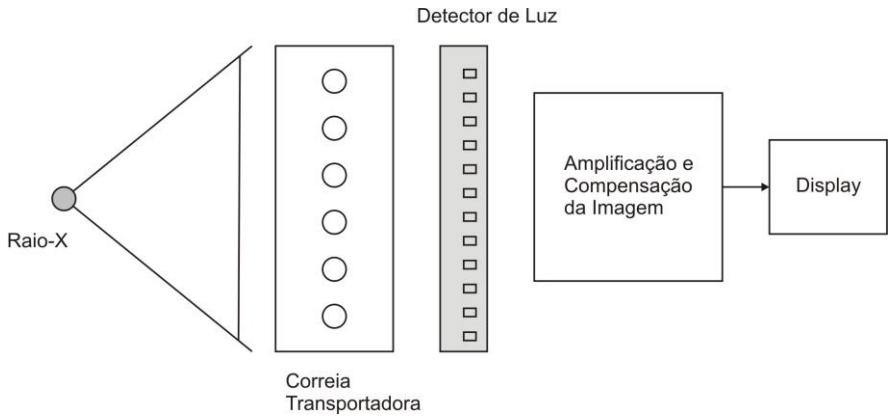
- *Método de detecção de rasgos de correias baseado por identificação de radiofrequência* (RFID) (NICOLAY, 2004): Na Figura 23 ilustra-se a configuração de medição para a detecção de rasgos em correia transportadora baseado na identificação de radiofrequência. Desta maneira ao ouver rasgos na correia esta danificará as antenas posicionadas ao longo da correia e assim se realizara a detecção da posição na qual aconteceu a falha.

FIGURA 23. Detecção de rasgos na correia transportadora usando RFID.



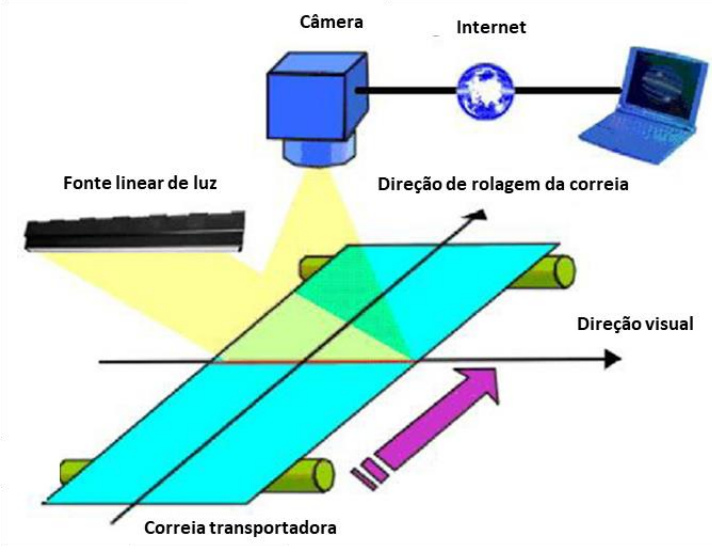
- *Método de detecção de Raios-X* (Guan, 2008): O raio-X tem diferentes atenuações para diferentes substâncias, e desta maneira é possível detectar diferentes formas, tamanhos e objetos com várias características físicas e químicas. Entretanto, diversos fatores afetam a precisão da detecção, por exemplo, a origem dos raios X, o espectro de frequência dos raios X e a distância entre o objeto examinado e a origem dos raios X, etc. Na Figura 244, ilustra-se uma configuração de medição usando raios-X.

FIGURA 24. Monitoramento de correias transportadoras por Raio-X.



- *Método de detecção de falhas usando processamento de imagens* (YANLI, 2014): Embora os métodos eletromagnéticos, RFID e de raio-X sejam usualmente empregados, eles têm uma capacidade limitada de detecção de desgastes e falhas nas correias transportadoras, devido principalmente aos ambientes críticos de operação das correias transportadoras para aplicações de minas, com elevadas temperaturas, umidade extrema, uso de materiais abracivos, etc. Uma proposta atual, utiliza câmeras para a detecção de falhas em conjunto com técnicas de processamento de imagens, realizando a segmentação e binarização das imagens, como se ilustra na Figura 25.

FIGURA 25. Inspeção de correias transportadoras usando câmeras.



- *Método de medição da espessura de correias transportadoras usando ultrassom*: Diversos equipamentos baseados em transdutores ultrassônicos são utilizados para o monitoramento da espessura de correias transportadoras utilizadas em ambiente de mineração, como ilustrado na Figura 26. O principio de medição baseia-se na separação de ecos de ultrassom que ultrapassam o material de borracha e reflete na lona têxtil. Embora esta técnica seja bastante precisa, requer-se a parada de operações da correia transportadora, assim como a inspecção em pontos discretizados, aumentando-se assim a incerteza na determinação do desgaste médio da correia transportadora.

FIGURA 26. Medição de espessura de correias transportadoras usando ultrassom.

2.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as definições fundamentais sobre transdutores ultrassônicos e o principio de medição de distância baseada na técnica de medição da diferença de tempo de viagem de uma onda de ultrassom (ToF: *time-of-flight*). Foram apresentadas as caracteristicas de correias transportadoras e as formas típicas de desgastes. Finalmente, foram apresentadas as principais técnicas de inspecção de correias transportadoras.

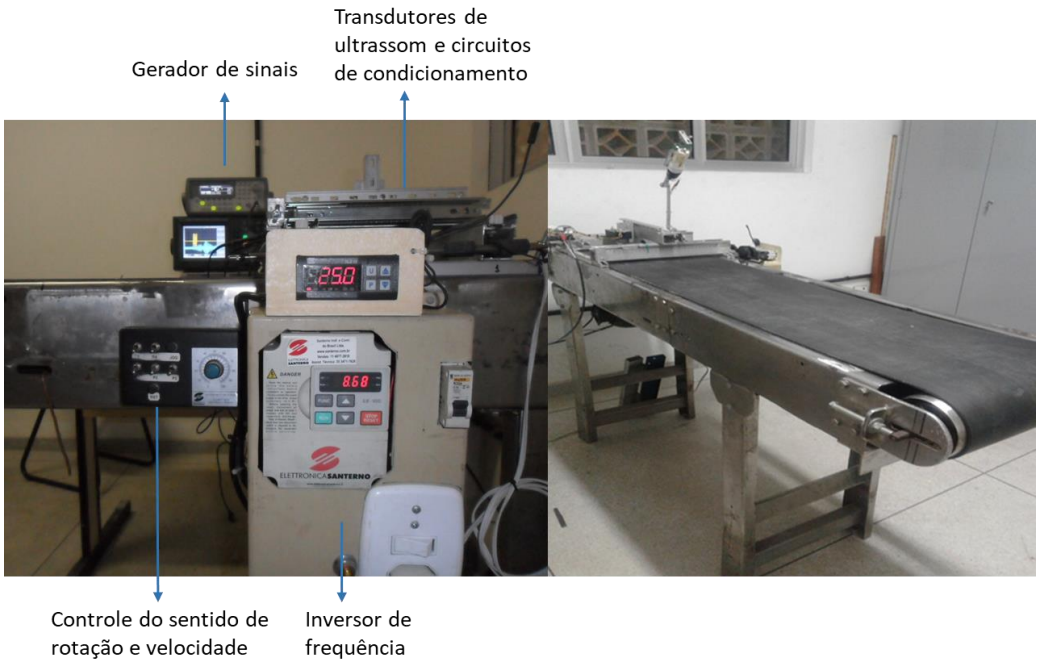
3 ESTIMAÇÃO DA ESPESSURA DA CORREIA TRANSPORTADORA

Neste capítulo será apresentada a configuração de medição de espessura de correias transportadoras instalada sobre uma estrutura do tipo esteira. Para a medição da espessura será apresentada a técnica de correlação cruzada para estimação do tempo de trânsito ultrassônico. Complementarmente, serão caracterizadas as falhas produzidas na correria transportadora as quais serão objeto de estudo.

3.1 CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO

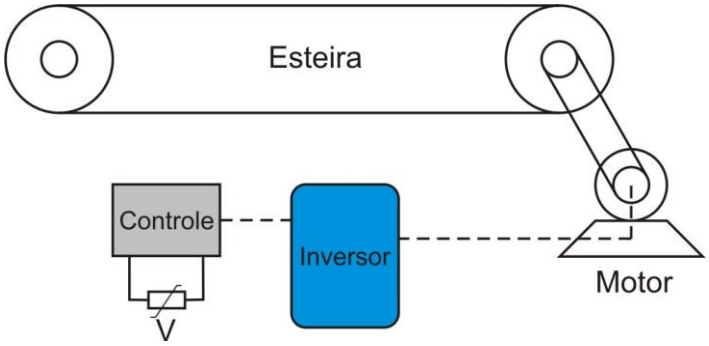
Para se desenvolver um sistema de monitoramento de desgastes de correias de esteiras transportadoras a partir da construção de um cenário de laboratório foi necessário primeiramente construir uma esteira transportadoraque atendesse a todas as necessidades da pesquisa e que possuísse todas as características de uma esteira transportadora industrial (estudo de caso). Concluída esta etapa foram realizadasas adequações mecânicas em todas as partes moveis, em seguida foi realizado o dimensionamento do motor trifásico e a parametrização do inversor utilizado para seu acionamento e controle. Na Figura 27 ilustra-se a estrutura da esteira transportadora com alguns de seus componentes instalados.

FIGURA 27. Configuração de medição.



Complementarmente foram realizadas: a instalação do motor de indução assíncrono trifásico, a parametrização do inversor de frequência utilizado para controle de velocidade, controle do sentido de rotação e proteção contra falhas elétricas do motor e a instalação de um controle local remoto para o inversor. Na Figura 28 ilustra-se detalhes da construção da configuração de medição representado por um diagrama de blocos.

FIGURA 28. Diagrama de blocos do setup de acionamento da correia transportadora.



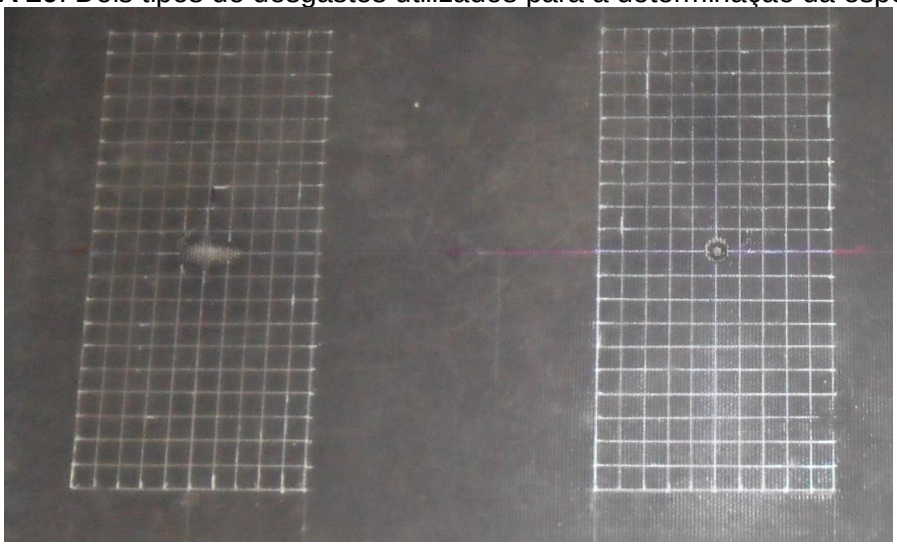
Detalhes do diagrama de blocos:

- Esteira metálica de aço inox com as seguintes dimensões: 1600 mm x 380 mm;
- Dimensões dos rolos de inox: 120 mm de diâmetro, 340 mm de comprimento, e 450 mm comprimento do eixo de ponta a ponta.
- Carga mecânica: 740 watts.
- Carga elétrica maior ou igual a 1cv
- Acoplamento indireto do motor por meio de uma correia de transmissão.
- Velocidade de rotação: 100 rpm a 350 rpm.
- Motor trifásico de indução WEG, 220/380V, 6 pólos, 1cv;
- Inversor: Fabricante Santerno, modelo: LE 100;
- Controle Remoto: Botões B1, B2, B3, para acionamento da esteira em sentido horário, anti-horárioemudança de sentido, B4, B5 e B6 para seleção de velocidade, e V para controle linear da velocidade.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DESGASTES NA CORREIA TRANSPORTADORA

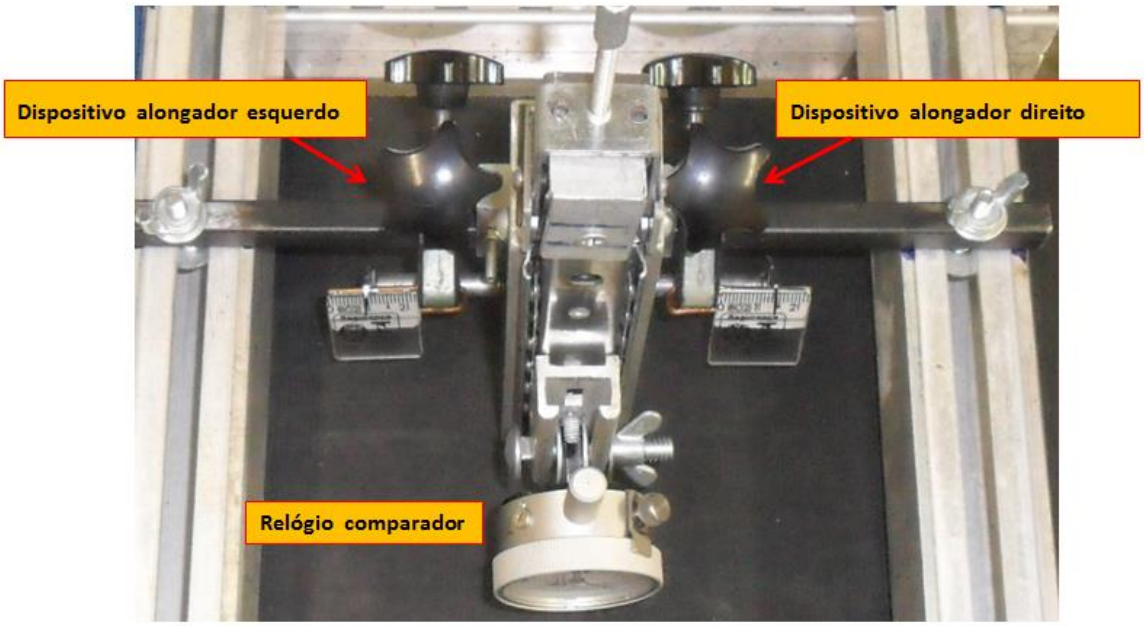
O sistema de monitoramento avalia a diferença de espessura da correia que acontece devido a desgastes, que podem ser por uso contínuo ou por acidente (material abrasivo). Para recriar estes cenários, neste trabalho foram considerados dois estudos de caso com desgastes que foram criados e caracterizados, isto é, determinação da área do desgaste e profundidade, com relação à correia transportadora sem desgaste, como se ilustra na Figura 29.

FIGURA 29. Dois tipos de desgastes utilizados para a determinação da espessura.



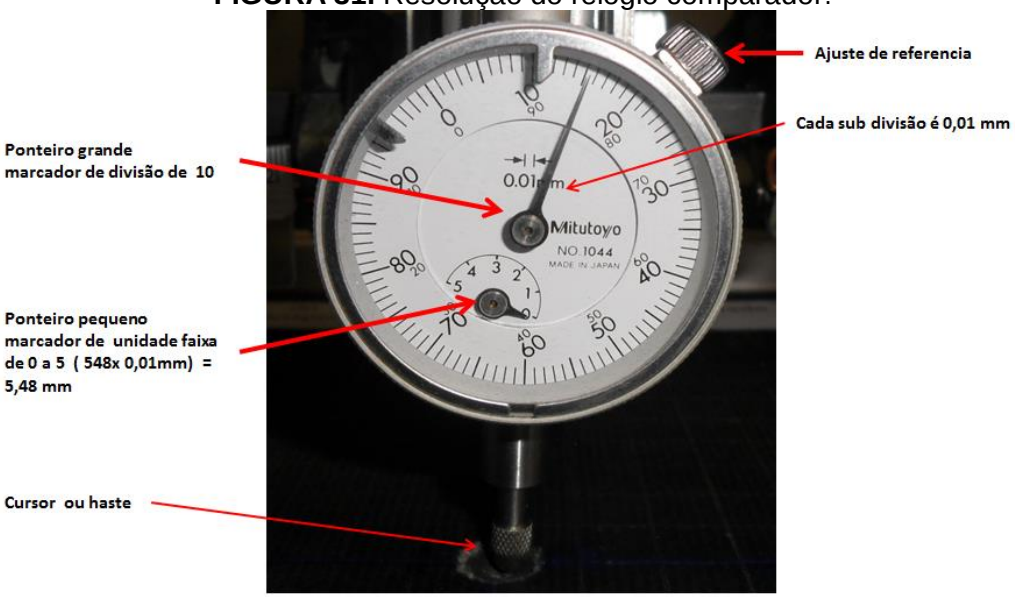
A medição da espessura concernente aos desgastes da correia transportadora foi realizado com o auxílio da plataforma de medição de espessura que utiliza um instrumento de medição de espessura/profundidade baseado em um relogio comparador, como se ilustra na Figura 30. Este instrumento foi possicionado inicialmente na parte central do desgaste, e em seguida o instrumento foi deslocado nos eixos vertical e horizontal. Este deslocamento teve um passo de resolução de 0,5 mm. Para efeitos de caracterização do desgaste, foi considerado uma região do formato quadrado com lado igual 10 mm, em cujo centro encontra-se o desgaste análisado.

FIGURA 30. Relogio comparador para caracterização dos desgastes.



O relógio comparador contém dois ponteiros, o ponteiro pequeno indica unidade e o ponteiro grande centésimo de unidade (0,01 mm). O fundo de escala do relógio comparador vai de 0 mm a 5,48 mm, como se ilustra na Figura 31. Portanto é possível conseguir uma boa precisão de leitura.

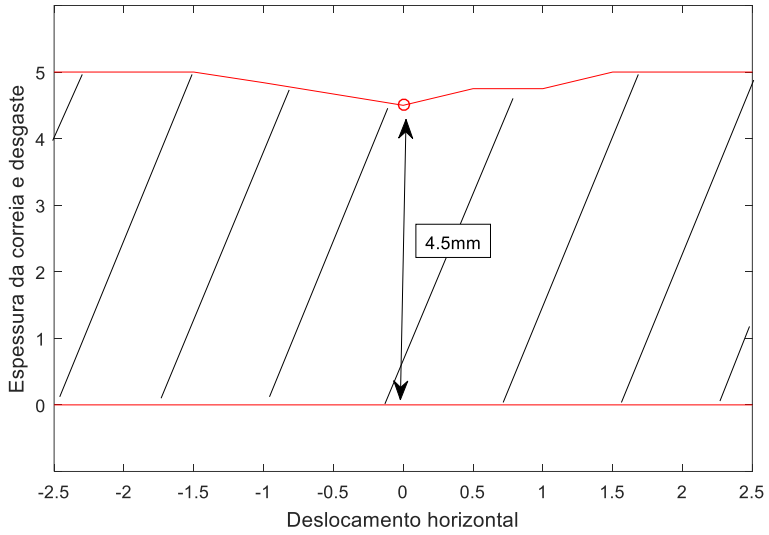
FIGURA 31. Resolução do relógio comparador.



Por meio do uso do relógio comparador, foram caracterizados dois cenários para estimação do desgaste na correia transportadora, com 0,5 mm e com 2 mm. Na

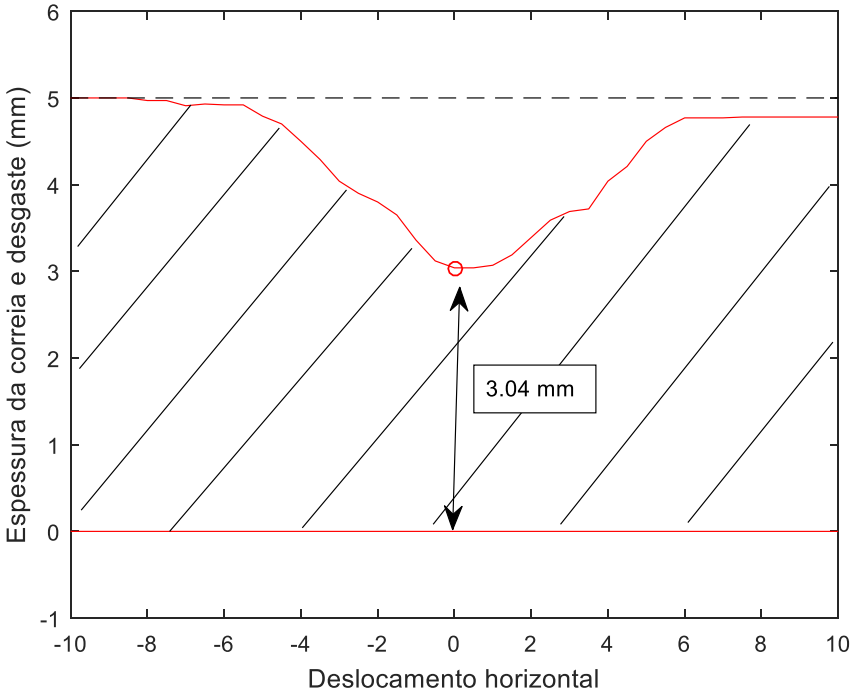
Figura 32, ilustra-se a caracterização do desgaste na correia transportadora, e observa-se que o desgaste tem uma profundidade máxima de 0,5 mm.

FIGURA 32. Caracterização do desgaste de 0,5 mm.



Na Figura 33 ilustra-se a caracterização do desgaste na correia transportadora, e observa-se que o desgaste tem uma profundidade máxima de 2 mm.

FIGURA 33. Caracterização do desgaste de 2 mm.



3.3 CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA A TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE SINAIS DE ULTRASSOM

O sistema de monitoramento de desgaste de correias transportadoras utiliza transdutores ultrassônicos, par transmissor-receptor em conjunto de circuitos de condicionamento de sinais.

O transdutor ultrassônico que foi utilizado é do modelo TR40-10L fabricado pela Companhia Waitrony, este foi escolhido por atender as especificações do projeto e por ser de baixo custo. As especificações do transdutor estão de acordo com o apresentado na Tabela 4.

TABELA 4. Especificações elétricas do transdutor TR40-10L.

FREQUENCIA CENTRAL (KHZ)	40 ± 1kHz
TENSÃO MÁXIMA PERMITIDA	20 V_{RMS}
TEMPERATURA OPERAÇÃO (°C)	-30~+80
TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO	-40~+90
CAPACITÂNCIA (RECEPTOR)	2500 pF ± 20%
SENSIBILIDADE (RECEPTOR) 40 KHZ	-74dB/V/μbar

A Figura 34 ilustra a resposta em frequência versus a sensibilidade relativa, indicando que o sensor ultrassônico tem mais rendimento quando ajustado para a frequência de 40 kHz. Na Figura 35 ilustra-se o transdutor ultrassônico utilizado neste trabalho.

FIGURA 34. Resposta em frequência versus sensibilidade relativa (%).

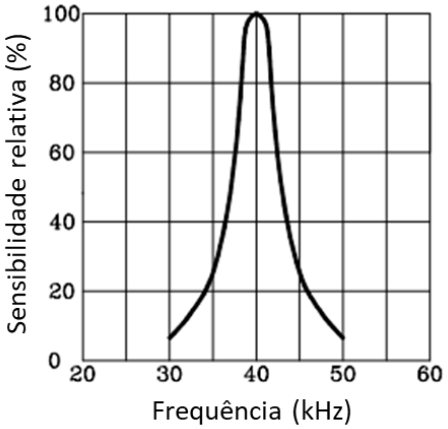
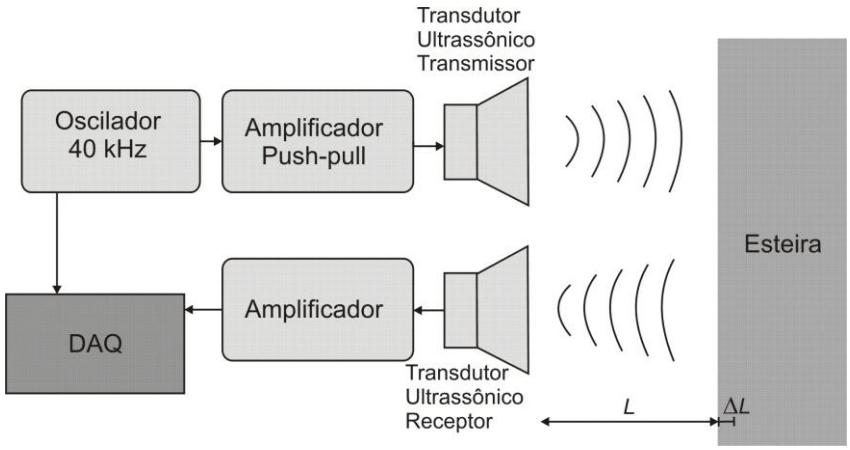


FIGURA 35. Transdutor ultrassônico modelo TR40-10L.

O sistema de detecção de desgaste das correias, utiliza os transdutores ultrassônicos como meio de detecção de variações de espessura nas correias transportadores (ΔL). Este princípio, utiliza o método do Tempo de Trânsito (ToF-*Time-of-Flight*) que se baseia na medição do tempo de propagação de um sinal ultra-sônicodesde a emissão do sinal em um transdutor transmissor até a detecção do sinal em um transdutor ultrassônico receptor, como se ilustra na Figura 36. Nesta figura, observa-se a definição de uma distância de referência entre os transdutores e a esteira (L) e uma variação de espessura da esteira (ΔL) que será medida pelos transdurores ultrassônicos.

FIGURA 36. Diagrama de blocos detalhando a funcionalidade da placa de condicionamento de sinal.



A placa de condicionamento de sinal para o transdutor ultrassônico transmissor é constituída por um circuito amplificador do tipo *push-pull*, como se ilustra na Figura 37. O circuito receptor é composto por um amplificador inversor de ganho variável, como ilustrado na Figura 38 (LUCENA, 2017).

FIGURA 37. Circuito para a transmissão de ondas de ultrassom (TX).

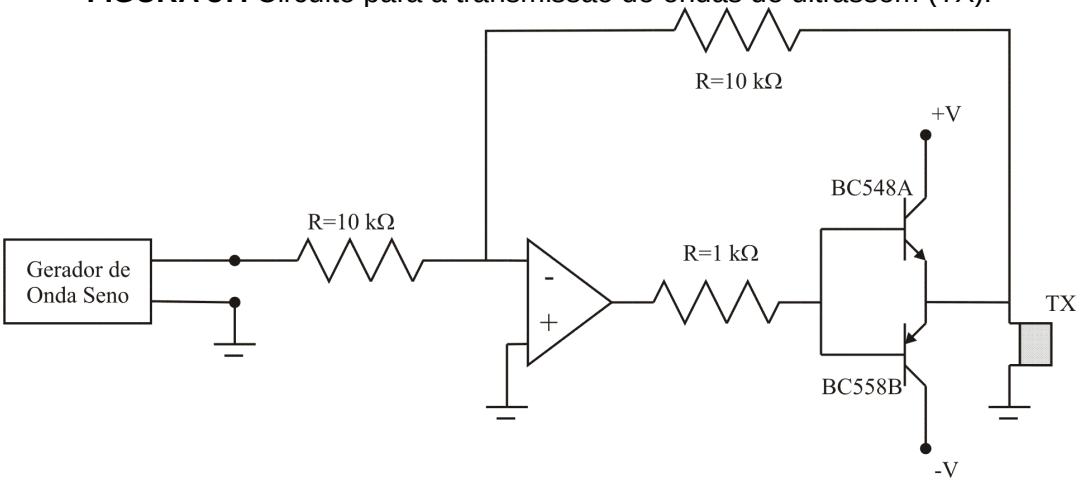
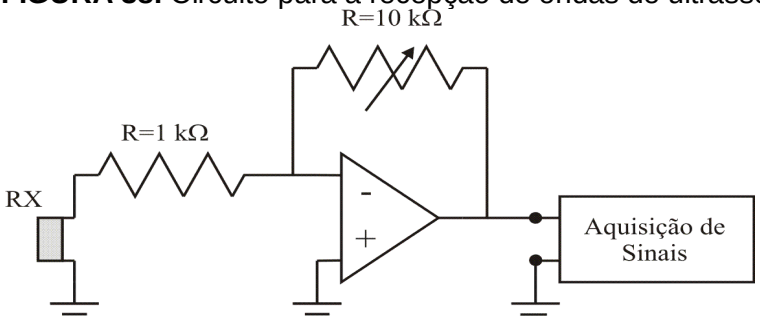


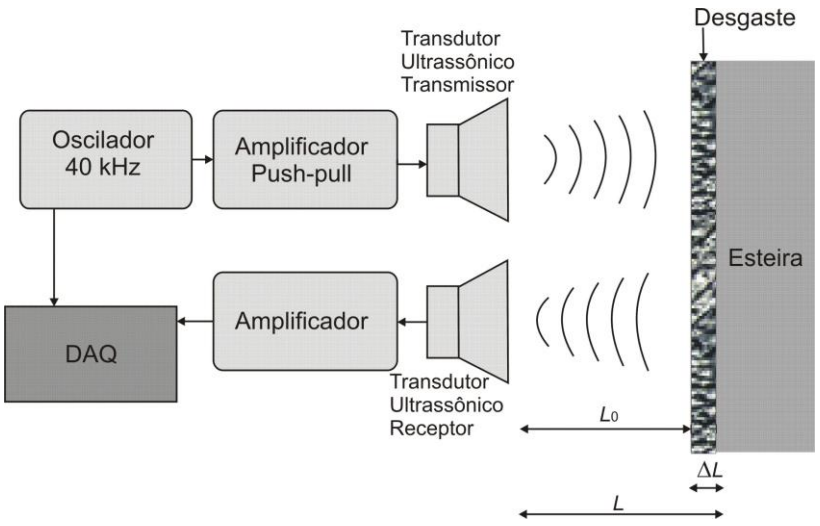
FIGURA 38. Circuito para a recepçao de ondas de ultrassom (RX).



3.4 ALGORITMO PARA A ESTIMAÇÃO DA ESPESSURA

Na Figura 39 ilustra-se a configuração do sistema de medição de desgaste de correias, na qual é representada a correia transportadora com um desgaste ΔL.

FIGURA 39. Configuração do sistema de monitoramento de desgastes.



Inicialmente, o sistema é calibrado para determinar a distância (L_0) entre os transdutores ultrassônicos e a esteira, sem desgaste, que pode ser obtido por:

$$L_0 = \frac{ToF \times C}{2} \tag{3.1}$$

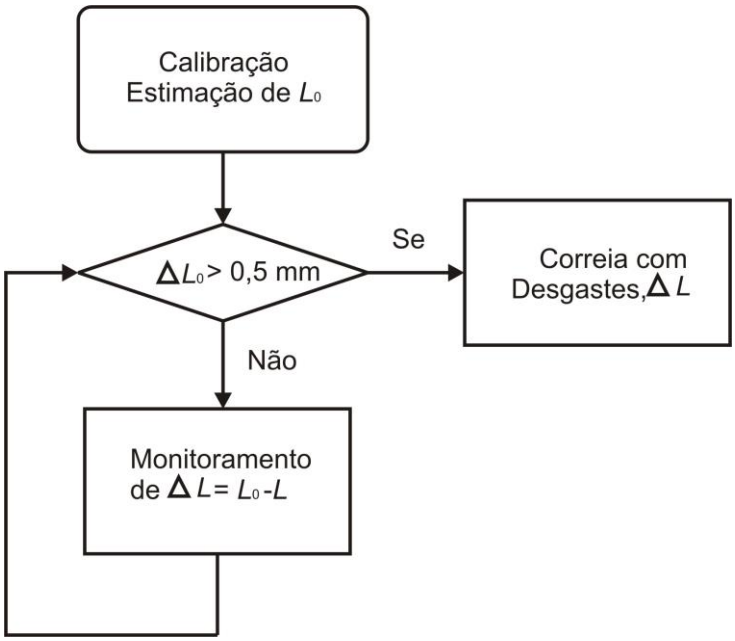
Em que: L_0 é a distância de calibração entre os transdutores e a correia, *ToF* é o tempo de trânsito, e *C* é a velocidade do som que depende da temperatura do meio (em graus ºC), dado por:

$$C = 20,074\sqrt{T_c + 273,15} \tag{3.2}$$

Na equação (3.1) observa-se que a estimação da distância depende da velocidade do som e da estimação do ToF. Sendo que a estimação da velocidade do som pode ser determinada por meio da medição da temperatura, portanto, a grandeza de interesse vem a ser o ToF. Neste trabalho, foi escolhida a técnica da correlação cruzada apresentada na seção 2.3 item “C”, devido principalmente a sua robustez na estimação do ToF, mesmo em ambientes com baixos níveis de SNR.

Em seguida, durante a operação ou uso da correia a distância $L=L_0+\Delta L$ é monitorada pelo sistema ultrassônico, obtendo-se assim a estimação do desgaste da correia, medida em milímetros, ΔL. Caso a variação da distância for maior que 0,5 mm, o sistema alertara desgastes na correia transportadora. Este procedimento de monitoramento das correias é ilustrado na Figura 40.

FIGURA 40. Diagrama de fluxo do procedimento de monitoramento de correias.



3.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a estrutura da esteira transportadora para a medição da espessura da correia. Foi realizada a caracterização de dois tipos de desgastes os quais serão objeto de estudo no seguinte capitulo. Foram apresentados os circuitos de condicionamento usados para a transmissão e recepção do sinal de ultrassom. Finalmente, foi apresentado o procedimento para a medição de espessura realizada de forma indireta por meio da medição do tempo de trânsito ultrassônico.

4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados de experimentais realizados na estrutura da correia transportadora, considerando os defeitos caracterizados nas seções anteriores. Os resultados contemplam a avaliação estatística das medições, determinando-se o valor médio e desvio padrão para cada cenário de medição. Nos cenários são realizadas aquisição de dados em uma superfície lisa com a esteira parada e em movimento.

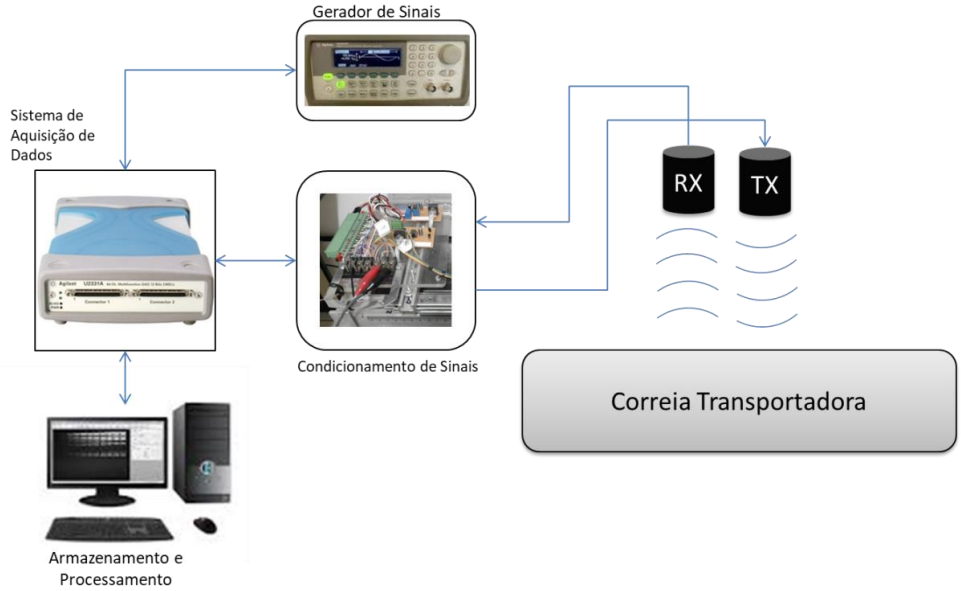
4.1 AQUISIÇÃO DOS SINAIS TRANSMITIDOS E RECEBIDOS

A configuração de medição utilizada esta composta por:

- Transdutores ultrassônicos com frequência de operação de 40 kHz e largura de banda de 6 kHz;
- Circuitos de condicionamento para a transmissão e recepção;
- Sistema de aquisição de dados multicanal (Agilent U2331A) com frequência de amostragem de 400 kamostras/seg (período de amostragem de 2,5 μs);

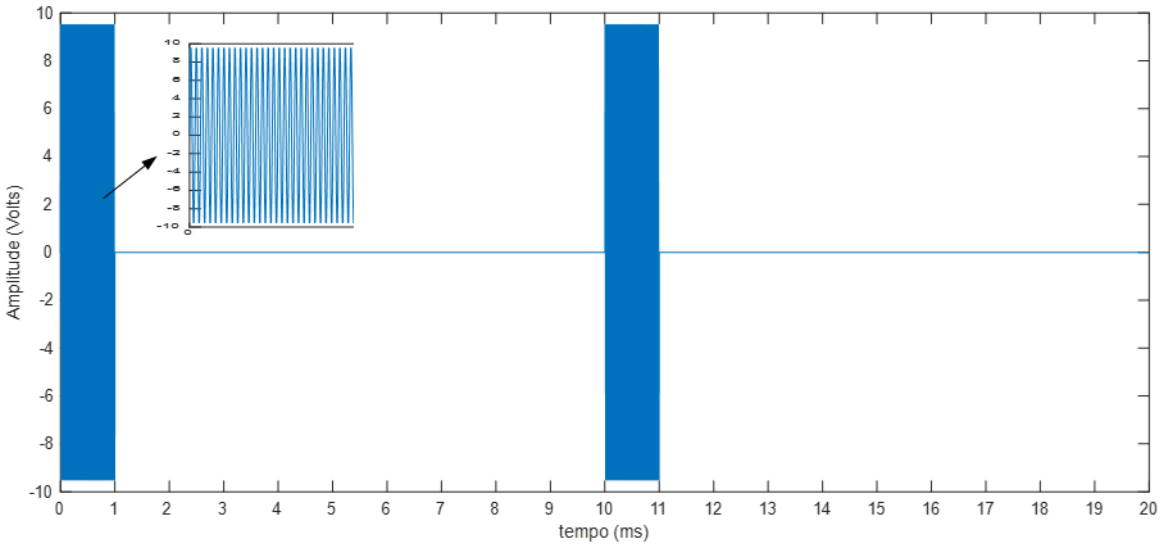
Desktop para armazenamento dos dados adquiridos. Figura 41 ilustra-se a configuração de medição para a aquisição e processamento dos sinais de ultrassom para a estimação da correia transportadora.

FIGURA 41. Configuração de medição.



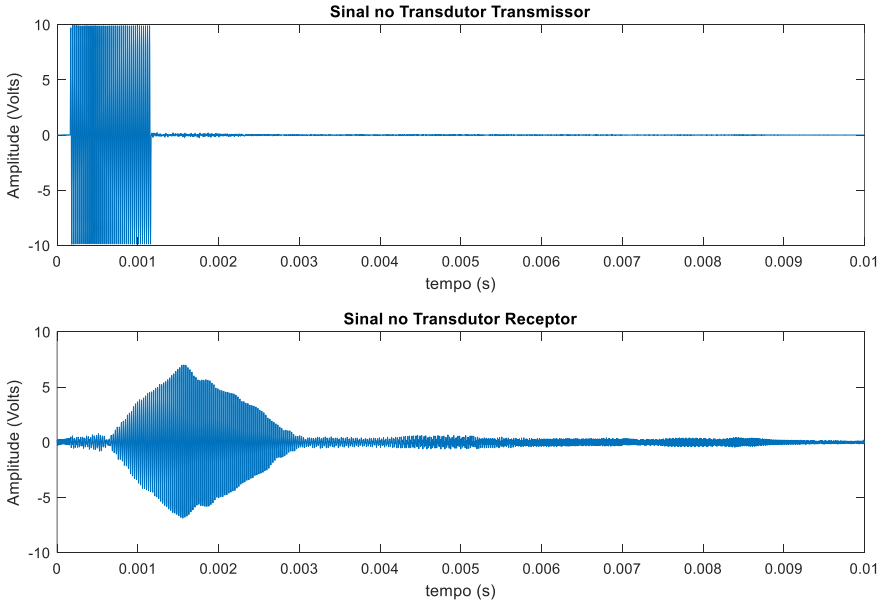
Na configuração de medição apresentada na Figura 41, o gerador de sinais foi configurado para uma geração de sinais sinusoidais com frequência de 40 kHz, com amplitude 10 volt. A geração foi do tipo trem de pulsos (*burst*) enviando 40 pacotes de ondas com períodos de 10 ms, como se ilustra na Figura 42.

FIGURA 42. Geração do sinal para o transdutor ultrassônico.



Na Figura 43 ilustra-se uma aquisição de sinais no transdutor ultrassônico transmissor e receptor, respectivamente. Observa-se que o sinal receibido já sofreu a amplificação do circuito de condicionamento.

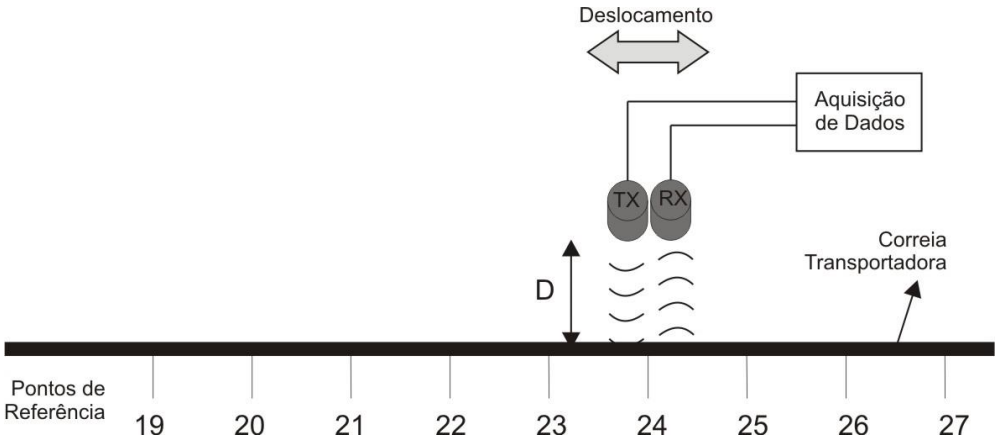
FIGURA 43. Sinais nos transdutores transmissor e receptor.



4.2 CENÁRIO 1: AQUISIÇÃO DE DADOS EM SUPERFICIE LISA

O primeiro cenário de medição teve como objetivo realizar a medição da distância entre os transdutores ultrassônicos e a superfície lisa da correia transportadora, como se ilustra na Figura 44. Observa-se nesta figura o deslocamento do sistema de aquisição de dados a qual permite realizar a medição transversal de vários pontos de referência sobre a correia transportadora.

FIGURA 44. Medição da distância entre os transdutores e a superficie.



A Tabela 5 contêm os resultados da medição do ToF e da distância para os pontos de referência 22 e 24. Para cada ponto de referência foram realizadas 100 medições com a finalidade de estimar o valor médio e desvio padrão do Tempo de Transito, e na sequência o valor da distância *L* e consequentemente o valor do desgaste ΔL.

TABELA 5. Medições do TOF e da distância para os pontos 20, 22 E 24.

Ponto de Referência			Estimação ToF (μs)	Incerteza u_{ToF}(μs)	Distância D (mm)	Incerteza u_D(mm)	Temperatura (°C)
22			454,45	8,33	78,82	1,44	25,5
24			455,24	8,95	78,87	1,55	24,8

A incerteza associada à estimação do ToF foi de aproximadamente 8,5 μs (Tabela 6) cujas fontes estão associadas principalmente ao ruído elétrico da medição que influência a amplitude do sinal do transdutor receptor e as vibrações da estrutura

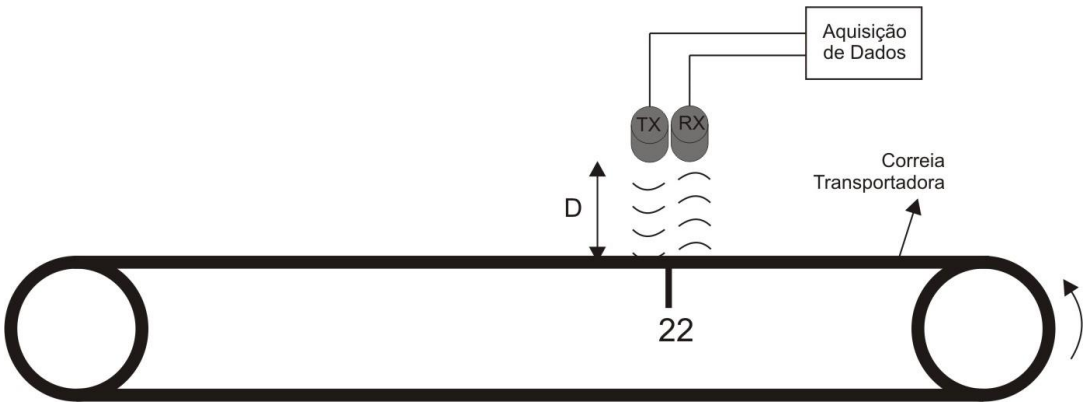
que alteram as estimações do ToF devido ao deslocamento da posição da correia transportadora com referencia ao ponto de medição.

Com relação a incerteza associada a medição da distância (D), com um valor médio de 1,5 mm, gerando um intervalo de confiança de 78,8 $\pm$1,5 mm, isto é, o valor verdadeiro é desconhecido, mas encontra-se possicionado neste intervalo. A fonte desta incerteza é relacionada à incerteza do ToF. Por tanto, para conseguir estimação com menor incerteza de medição, poderiam se aprimorar as técnicas de estimação do ToF, como por exemplo, aplicar filtros atenuadores de ruído e sistemas de amortecimento de vibrações.

4.3 CENÁRIO 2: MEDIÇÃO LONGITUDINAL NO PONTO DE REFERÊNCIA 22

O segundo cenário de medição teve como objetivo realizar a medição da distância entre os transdutores ultrassônicos e a superfície da correia transportadora, com a esteira em movimento, como se ilustra na Figura 45.

FIGURA 45. Medição da distância no ponto de referência 22.



No controle de velocidade da esteira, a velocidade de rotação do motor depende da configuração do inversor de frequência, e é relacionada com o campo girante por meio de (4.1).

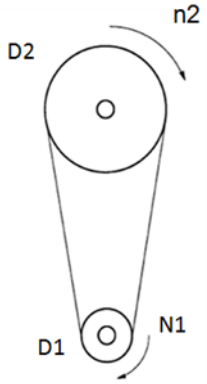
$$N = \frac{120 \times f}{p} \ rpm \tag{4.1}$$

Onde *N:* velocidade do motor em rotações por minuto (rpm), *p:* número de polos do motor e *f:* frequência do inversor.

O acoplamento do motor com esteira é indireto, através de uma correia de transmissão do tipo A-31, portanto existe uma redução de velocidade do motor para esteira transportadora. Neste acoplamento a polia do motor possui o diâmetrode 71 mm (*D1*) e a polia da esteira de 94 mm (*D2*), conforme a
Figura 4, sendo *N1* a velocidade do motor e *n2* a velocidade da polia da esteira, dada em (4.2).

$$n2 = \frac{N1 \times D1}{D2} \ rpm \tag{4.2}$$

FIGURA 46. Polia do motor (D1, N1) e polia da esteira (D2, N2).



A Tabela 6 contém os resultados do monitoramento da espessura do ponto de referência 22, considerando-se o movimento da correia transportadora com duas velocidades de rotação do motor diferentes, de 15,1 Hz e 20 Hz. Observa-se que com o aumento da velocidade de rotação da esteira, são introduzidas vibrações na estrutura da esteira que prejudicam a operação dos transdutores ultrassônicos e a exatidão na estimação da espessura da correia. Para minimizar este efeito, técnicas de processamento digital de sinais podem ser utilizadas para a filtragem do sinal, como uma etapa de pré-processamento do sinal antes de ser realizada a estimação do ToF.

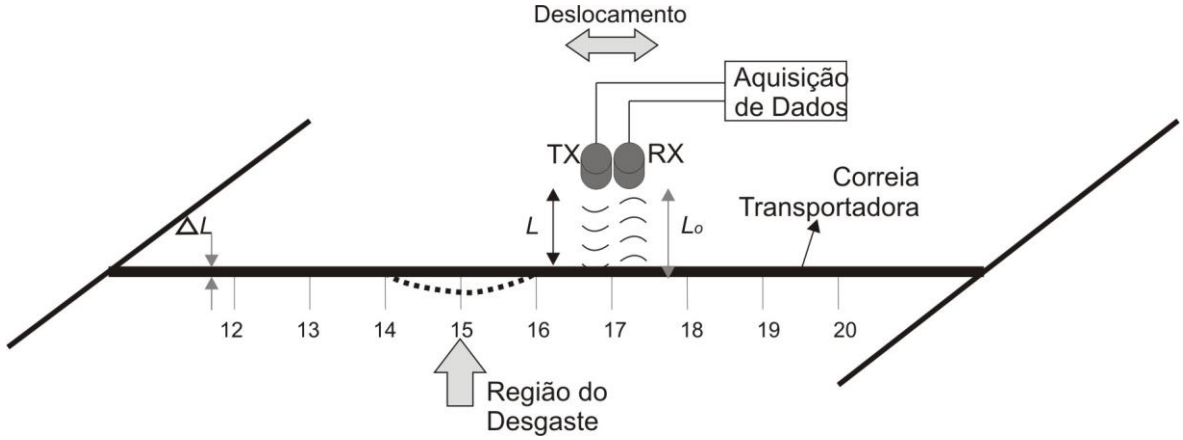
TABELA 6. Medições do tof e da distância para o ponto 22, com diferentes velocidades da esteira.

Hz (Inversor de Frequencia)	*n2* (rpm)	Estimação ToF (μs)	Distância D (mm)	Temperatura (°C)
15,1	228	455,00	79,05	26,5
20	302	451,25	78,33	26,0

44. CENÁRIO 3: MEDIÇÃO DA ESPESSURA PARA O DESGASTE DE 0,5 MM

No terceiro cenário de medição, foi realizado a medição da espessura para o desgaste de 0,5 mm que foi caracterizado e apresentado na Figura46. Para este proposito foram realizadas as medições em cada ponto de referência na qual se encontra contidas o desgaste, como se ilustra na Figura 47.

FIGURA 47. Medição da distância no ponto de referência 22.



A Tabela 7 contém as medições iniciando-se no ponto de referêncoa 14 e finalizando-se no ponto 20. Observa-se que existe uma variação significativa na região concentrada entre os pontos 14 a 16, na qual está localizada o desgaste gerado em laboratório, tendo-se um desgaste médio de 0,5 mm no ponto de referência 15. Embora os resultados sejam promissórios, a obtenção destes resultados foi realizada com a correia transportadora em estado parado. O movimento da correia transportadora gera vibrações significativas que inducem a erros de medição fora do

esperado. Possiveis soluções podem ser a inclusão de sistemas de absorção de vibrações na estrutura do sistema de medição.

TABELA 7. Medições para o terceiro cenário.

Ponto de Referência	Distância L (mm)	ΔL (mm)
20	78,83	3,67
19,5	78,85	3,65
19	78,9	3,60
18,5	78,8	3,70
18	78,95	3,55
17,5	78,89	3,61
16,5	78,92	3,58
16	79,15	3,35
15,5	79,20	3,30
15	79,34	3,16
14,5	79,1	3,4
14	78,96	3,54

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema para o monitoramento da espessura da correia transportadora utilizando transdutores ultrassônicos. A partir dos resultados obtidos foi observado que o procedimento de estimação da distância entre os transdutores ultrassônicos e a superfície da correia transportadora pode ser obtido com suficiente exatidão com a técnica de correlação cruzada.

Com relação ao condicionamento de sinais, foi observado que a transmissão dos pacotes de ondas (*burts*) no transdutor ultrassônico transmissor também deve ser configurada com a finalidade de gerar um eco com suficiente potência no transdutor ultrassônico de recepção.

Outra importante observação foi que a vibração da estrutura metálica da esteira influência diretamente na estimação da distância e, portanto, da espessura da correia transportadora. Como trabalho futuro, propõe-se o uso de ferramentas de processamento digital de sinais para o pré-processamento dos sinais, como uma etapa previa na estimação do tempo de trânsito (ToF).

Complementarmente, como trabalho futuro, propõe-se que sejam realizadas implementações de técnicas de filtragem digital para o cancelamento de ruído presente no sinal de ultrassom. Assim também sugere-se que sejam realizados estudos mais amplos com relação a estimação do ToF com a correia transportadora em movimento.

REFERÊNCIAS

ANGRISANI L., BACCIGALUPI A., MORIELLO R.S. (2006), A Measurement Method Based on Kalman Filtering for Ultrasonic Time-of Flight Estimation, IEEE **Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 55, n. 2, p. 442-448.

COSTA, M.M.; FREIRE, R.C.S.; VILLANUEVA, J.M.M.; (2013). **Wind speed measurement based on ultrasonic sensors using Discrete Fourier Transform**. **IEEE** International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Pages: 499 – 504.

GOLDBECK L. (2011). **Improved maintenance reduces risk, raises profitability in conveyor operations**. IEEE-IAS/PCA 53rd Cement Industry Technical Conference.

GUAN, Y.; ZHANG, J.; SHANG, Y.Y. (2008). **Embedded sensor of forecast conveyer belt breaks**. 5thInternational Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, p. 617–621.

HIRATA., S; YANAMAKA, K.; HACHIYA, H. (2017). **Evaluation of position and velocity measurement for a moving object by pulse compression using ultrasound coded by preferred-pair M-sequences**. IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Pages: 1 – 4.

KAIMAL J.C., BUSINGER J.A. (1963), A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer, **Journal of Applied Meteorology**, v. 2, n. 1, p.156-164.

KHYAM, M.O.; SAM-GE, S.; LI, X.; PICKERING, M.R. (2017). Highly Accurate Time-of-Flight Measurement Technique Based on Phase-Correlation for Ultrasonic Ranging. IEEE **Sensors Journal Year**, v. 17, Issue: 2 Pages: 434-443.

KREDBA, J.; HOLADA, M. (2017). **Precision ultrasonic range sensor using one piezoelectric transducer with impedance matching and digital signal processing.** IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM). Pages: 1-6.

MORALES, A.S.; AQUEVEQUE, P.; HENRIQUEZ, J.A.; SAAVEDRA, F.; WIECHMANN E.P (2017). **A technology review of idler condition based monitoring systems for critical overland conveyors in open-pit mining applications**. IEEE Industry Apllications Society Annual Meeting.

NABA, A.; KHOIRONI, M.F.; SANTJOJO D.H.S. (2015). **Low cost but accurate ultrasonic distance measurement using combined method of threshold-correlation**. International Conference on Quality in Research (QiR).

NICOLAY, T.; TREIB, A.; BLUM, A. (2004). **RF identification in the use of belt rip detection**. Proc. IEEE Sens. p. 333–336.

LUCENA, D.C.; VILLANUEVA, J.M.M.; FREIRE, R.C.S.; LUCIANO, B.A.; FARIAS, W.P. (2017), **Design considerations for ultrasonicsignalsacquisition**.2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). Pages: 1–6.

PALLAS-ARENY R., (2001). **Sensors and Signal Conditioning**, 2nd Edition, John Wiley and Sons.

PANG. Y.; LODEWIJKS, G. (2006). **A novel embedded conductive detection system for intel-ligent conveyor belt monitoring**. IEEE Int. Conf. Service Operations andLogistics, and Informatics, p. 803-808.

PROAKIS J.G., MANOLAKIS D.G. (1995), **Digital Signal Processing**: Principles, Algorithms and Applications, Prentice Hall, 3ra Edition.

TIANYU, B. (2017). **A control method to prevent falling from a treadmill based on STM32 microcontroller and ultrasonic transducer.** 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). Pages: 5025 – 5028.

VELOSO, R.C. (2014). **Modelagem de Curvas de Degradação de Correias Transportadoras com Base em Covariáveis Inerentes ao Processo de Mineração**. Universidade Federal do Rio Grando Sul.

VILLANUEVA, J.M.M.; CATUNDA, S.Y.C.; TANSCHEIT, R. (2009). Maximum-Likelihood Data Fusion of Phase-Difference and Threshold-Detection Techniques for Wind-Speed Measurement. IEEE **Transactionson Instrumentation andMeasurement**. Volume: 58, Issue:7, Pages: 2189-2195.

WYER, N.V.D.; SCHRAM, C.; DYCK, D.V.; DIERCKX, M. (2017). The Effect of Non-Uniform Temperature and Velocity Fields on Long Range Ultrasonic Measurement Systems in MYRRHA. IEEE **Transactions on Nuclear Science**, v. 64, Issue: 2 Pages: 829-836.

YANLI, Y.; CHANGYUN, M.; XIANGUO, L.; XIUZHUANG, M. (2014). On-line conveyor belts inspection based on machine vision. Optik – **International Journal for Light and Electron Optics**, v.125 (19), p. 5803-5807.

YANG, W.; ZHANG, X.; WEI-MA, H. (2016). **An inspection robotusing infrared thermography for beltconveyor**.13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI).