

Investigação e Simulação de Sistema Robótico para Automação da Emenda de Correias Transportadoras[★]

Luan Fernandes Santos^{*,**} Luiz Guilherme de Barros^{*,**}
Guilherme Brito Rodrigues^{*,**} Paulo Brandão^{****}
Philip von Pritzelwitz^{**} Gustavo Freitas^{***}

^{*} Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração - Universidade Federal de Ouro
Preto, ((luan.santos, luiz.barros, guilherme.rodrigues)@pq.itv.org)

^{**} Instituto Tecnológico Vale, (philip.pritzelwitz@itv.org)

^{***} Universidade Federal de Minas Gerais, (gustavomfreitas@ufmg.br)

^{****} Vale S.A., (paulo.brandao@vale.com)

Abstract: Mining companies are expanding investments in the production cycle according to the Industry 4.0 concepts, from mines to export terminals. Steel cable belt conveyors are widely used to transport iron ore ensuring versatility and production flow. Despite the low operating costs, maintenance interventions on conveyors are constant, with vulcanized belt splicing being one of the most complex and long-lasting manual procedures. This paper addresses robotics systems to perform part of the process and increase the automation level of conveyor belt splicing, as part of a Vale S.A. project to ensure safety and quality standards procedures. Initially, we defined some stages of the splicing process to automate: the mapping of internal and external parameters of the belt and the the upper rubber layer removal. A virtual simulation environment and test benches assist the robotic system design, stating for the feasibility of using an industrial manipulator arm, instrumentation system, and rubber cutting tool. The conceptual and experimental validation of these individual tasks corresponds to the first step to automate the conveyor belt splicing process.

Resumo: As companhias mineradoras investem cada vez mais nos conceitos de Indústria 4.0 em seus ciclos produtivos, das minas aos terminais de exportação. Os transportadores de correia são amplamente utilizados para o transporte de minério, garantindo versatilidade e fluxo na produção. Apesar dos baixos custos operacionais, as intervenções para manutenção nos transportadores são constantes, com destaque para a emenda vulcanizada de correias, um complexo procedimento manual de longa duração. Como parte de um projeto da Vale para aumentar o nível de automação da emenda de correias transportadoras, este artigo estuda a aplicação de sistemas robóticos na execução do processo, visando aumentar os padrões de segurança e qualidade. Inicialmente foram escolhidas algumas etapas do procedimento de emenda a serem automatizadas: o mapeamento de parâmetros internos e externos da correia e a remoção da camada superior de borracha. O sistema robotizado está sendo desenvolvido com a ajuda de um ambiente virtual de simulação, mais duas bancadas de teste montadas para verificar a viabilidade da utilização de um braço manipulador industrial, sistema de instrumentação e ferramenta de corte de borracha. A validação conceitual e experimental destas etapas corresponde ao primeiro passo para automatizar o processo de emenda de correias.

Keywords: Process Automation and Robotization; Systems Simulation; Mining Robotics; Conveyor Belts.

Palavras-chaves: Automação e Robotização de Processos; Simulação de Sistemas; Robótica na Mineração; Correias Transportadoras.

1. INTRODUÇÃO

Seguindo a demanda do mercado por processos mais inteligentes e conectados, a indústria mineradora no Brasil investe cada vez mais em inovações amparadas no conceito de Indústria 4.0. As mudanças propostas por esse conceito permitem uma melhora consistente em eficácia, minimizando as taxas de falha e diminuindo o tempo no desenvolvimento de novas soluções. Os valores da transformação digital elevam o nível de sustentabilidade dos processos de mineração e aumenta a competitividade das empresas mineradoras (Bertayeva et al., 2019). Um dos pilares da Indústria 4.0 consiste na simulação e integração de sistemas, onde a interação entre o mundo físico e o mundo cibernético tem ganhado atenção. Neste contexto, os gêmeos digitais (*Digital Twins*) vem se estabelecendo na indústria como elementos chave nessa integração cyberfísica (Qi and Tao, 2018), alimentando modelos virtuais com dados do mundo real para fins de validação, predição de comportamento e ajustes dinâmicos. Os resultados validados em simulação podem ser então realimentados na planta física, permitindo responder a mudanças, melhorar a operação e gerar valor agregado.

Os transportadores de correia (TCs) são equipamentos amplamente utilizados na indústria da mineração devido a sua versatilidade, baixo custo operacional e capacidade de produção. Os TCs são duráveis e resistentes, operando com correias compostas de camadas de lona ou borracha e cabos de aço em seu interior. O transporte contínuo permite reduções de custos e maior produção, operação automática, além de possibilitar monitoramento e controle remotos. Na Vale, os TCs em funcionamento somam mais de 1000 km, distribuídos em diversos segmentos produtivos, das minas aos terminais de exportação, necessitando intervenções constantes para manutenção.

Os danos comuns dos transportadores estão relacionados ao impacto da carga, defeitos nos rolos, desalinhamento de correias, perfurações ou rasgos nas superfícies, bordas e núcleo, além de abrasão causada pela aceleração do material carregado. Os rolos são trocados com frequência estimada nas técnicas de manutenção preditiva, já intervenções corretivas na correia são geralmente realizadas num processo de emenda manual.

A emenda em correias transportadoras é um processo complexo, de longa duração, pouco automatizado e realizado com frequência em áreas operacionais da Vale. O tempo médio de trabalho é de 40 horas, demandando várias equipes para o cumprimento das etapas manuais, expondo os trabalhadores a riscos ergonômicos e acidentes de trabalho. Uma emenda de correia manual gera interrupções extensas na produção, além de um descompasso tecnológico na operação, onde vários processos são altamente automatizados.

A identificação de danos em correias transportadoras tem sido alvo de trabalhos nos últimos anos. Um sistema de diagnóstico baseado em medição de campos magnéticos e

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), do Instituto Tecnológico Vale (ITV), da Vale S.A., e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

redes neurais foi desenvolvido para gerar relatórios sobre o estado de correias transportadoras (Błażej et al., 2017). O software proporciona análise detalhada das condições da emenda, parâmetros geométricos, imagens 2D e dados estatísticos sobre o grau de dano do trecho de correia analisado. Outra solução apresentada em (Garcia et al., 2019) propõe a utilização de um dispositivo robótico móvel articulado com braço manipulador para a inspeção de correias transportadoras através de imagens coloridas e térmicas, informações de áudio e vibrações do transportador.

Para a automatização de emendas de correias, pesquisadores da Universidade de Hannover propõe a utilização de tecnologias de jato d'água para preparação da emenda, mais especificamente para remoção da camada superior de borracha e limpeza dos cabos de aço (Zaremba et al., 2017).

Como parte de um projeto da Vale para elevar o nível de automatização do processo de emenda, este artigo investiga sistemas automáticos para otimizar a eficiência dos serviços de emenda de correias. A solução proposta utiliza manipuladores robóticos instrumentados executando algumas das etapas da emenda, de forma a minimizar a exposição da equipe a riscos e reduzir o *downtime*. Uma proposta de conceito inicial é apresentada em (Rodrigues et al., 2019), utilizando um sistema de luz estruturada e processamento de imagens para a modelagem da correia. Este artigo apresenta uma nova proposta de instrumentação com base num sensor LiDAR.

A complexidade do processo de emenda exige ferramentas de validação das etapas automatizadas. Como solução a esta demanda está sendo desenvolvido um simulador para emular as diferentes etapas do processo de emendas, incluindo: modelagem interna, modelagem externa e remoção da camada superior de borracha. Os passos iniciais do procedimento de emenda são executados por um manipulador, devidamente equipado com sensor de distância, sensor indutivo e ferramenta de corte, simulados e validados experimentalmente em bancadas de testes.

Este artigo está dividido em seis seções: na Seção 2 é apresentado o procedimento de emenda manual realizada nas operações Vale. A Seção 3 descreve as etapas do processo de emenda que serão simuladas e validadas em testes de bancada. A Seção 4 detalha o simulador desenvolvido e as ferramentas implementadas. Resultados de simulação e experimentos de bancada são apresentados na Seção 5. Por fim, as conclusões são discutidas na Seção 6, junto com sugestões de trabalhos futuros.

2. PROCEDIMENTO PARA EMENDA DE CORREIAS

A emenda de correias é um procedimento de longa duração realizado atualmente de forma manual e que requer um grande número de trabalhadores envolvidos. A emenda é realizada ao lado do transportador em uma plataforma de trabalho com uma prensa de vulcanização no centro. A correia é colocada na plataforma com um guindaste de forma que cada uma das pontas fique em um lado da plataforma.

O primeiro passo da emenda manual é a delimitação do tamanho da emenda. O viés, linha que define o início de corte na borracha, é marcado pelo operador formando um

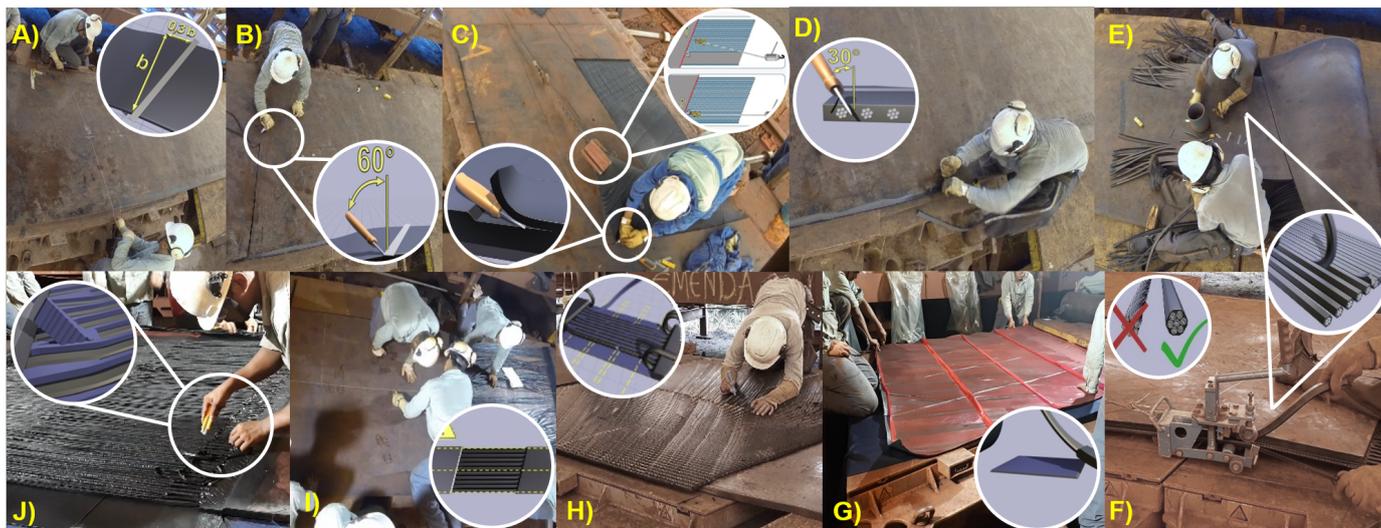


Figura 1. Etapas do procedimento de emenda manual de correias transportadoras realizado na Vale.

ângulo de 20° com a base da correia (Figura 1.a), e em seguida cortado com a faca olfa inclinada em 60° (Figura 1.b).

Para remoção da cobertura de borracha da correia, uma pequena aba é cortada com a faca olfa próxima ao viés, presa com uma garra e puxada com um trefor. O operador segue cortando com a faca até que a camada de borracha seja removida completamente, como apresentado na Figura 1.c. Normalmente a cobertura superior da correia é dividida em três partes e o procedimento realizado em cada uma dessas partes. O material é retirado nas duas faces da correia e também entre os cabos de aço, este com a faca inclinada em 30° (Figura 1.d).

A remoção de borracha entre os cabos de aço pode ser executada com a faca olfa e uma lixadeira para a realização do acabamento (Figura 1.e), ou com um equipamento próprio para o filetagem (Figura 1.f). O operador não deve limpar completamente os cabos, deixando em sua superfície uma pequena camada de borracha, que auxilia na adesão entre os cabos e coberturas da correia no final do procedimento de emenda.

Finalizado o processo de preparação, é iniciado a montagem da emenda, posicionando a cobertura inferior da correia e uma borracha mais macia (borracha de ligação) na mesa aquecida da prensa (platô), que deve estar previamente forrada com um tecido para que a borracha não agarre na prensa. Este passo é apresentado na Figura 1.g.

Os operadores marcam e cortam os cabos após a remoção da cobertura de borracha de acordo com o número de estágios, parâmetro que define a organização dos cabos dentro da emenda. Na Figura 1.h é possível observar a marcação dos cabos de uma emenda com dois estágios.

Com os cabos devidamente cortados, os dois lados da correia são posicionados e alinhados sobre o conjunto montado na prensa, e em seguida os cabos de aço são intercalados sobre o conjunto (Figura 1.i). Os espaços entre os cabos são então preenchidos com tiras de borracha de ligação, também conhecidas como macarrão (Figura 1.j). Em seguida uma camada de adesivo é aplicada nos cabos

e na correia, e uma outra camada de borracha de ligação e a cobertura superior da correia são posicionadas sobre estes para fechar o conjunto.

Feito todo o procedimento descrito e com todos os componentes da emenda posicionados, a prensa de vulcanização é ligada para finalizar o processo. Usualmente a temperatura de vulcanização é 145°C , a pressão mínima de 10 Kg/cm^2 e máxima de 14 Kg/cm^2 , e tempo de 3 minutos a cada 1 mm de espessura da correia. O aquecimento é desligado e o sistema mantido em pressão constante de 12 Kg/cm^2 até atingir temperatura menor que 100°C , para só então aliviar a pressão e abrir a prensa.

3. ETAPAS ROBOTIZADAS DO PROCESSO DE EMENDA DE CORREIAS

A realização da emenda de correias de forma automatizada é complexa, e por isso deve ser segmentada em etapas. Diante disso, este artigo apresenta propostas para a identificação, modelagem da correia, e remoção de camada superior de borracha. A modelagem da correia é utilizada como base para a execução das tarefas de corte apresentadas nas Figuras 1.b e Figura 1.c, não sendo mais necessária a marcação da correia apresentada na Figura 1.a.

3.1 Modelagem da Correia

A modelagem é baseada na identificação de parâmetros externos e internos da correia. Os parâmetros essenciais para a criação da representação digital da correia são indicados na Figura 2. O modelo digital obtido é utilizado como referência para remoção robotizada de camada superior da cobertura de borracha.

Modelagem Externa da Correia A modelagem externa é baseada na identificação dos parâmetros que definem a forma geométrica da correia: espessura e largura, e e l .

Numa etapa anterior desse projeto, Rodrigues et al. propuseram um sistema de modelagem externa da correia por processamento de imagens e triangulação geométrica. O sistema é composto por um laser, que emite um feixe de



Figura 2. Dimensões da correia e localização interna dos cabos de aço.

luz verde na correia, e uma câmera, que captura a imagem refletida na correia. A imagem RGB é processada numa matriz de pontos empregada no cálculo da espessura e largura, utilizando os pontos onde há degraus na reflexão do feixe na correia.

Entretanto, buscando uma solução mais robusta para a operação em áreas de mineração com variações de iluminação e poeira, foi proposta uma segunda estratégia para a medição externa da correia transportadora utilizando um sensor LiDAR (do inglês *Light Detection And Ranging*). Este sensor emprega o princípio de detecção conhecido como *Time of Flight* (ToF), emitindo um feixe de luz e medindo o tempo de ida e volta da luz para calcular a distância de objetos a sua frente.

Para a modelagem externa da correia, o sensor é instalado na flange de um braço manipulador, que deve executar movimentos de forma varrer a plataforma onde a correia está posicionada. É possível controlar várias juntas do manipulador gerando movimentos lineares no sensor sobre a extensão da plataforma para obter resultados mais precisos, ou apenas rotacionar uma junta do robô, o que reduz o tempo de modelagem porém fornece medidas menos precisas devido ao ângulo de incidência do feixe de laser na correia.

Modelagem Interna da Correia A modelagem interna tem como objetivo identificar o posicionamento vertical e horizontal dos cabos de aço dentro da correia. Cada modelo de correia possui uma especificação de organização interna dos cabos de aço, no entanto, há possibilidade de desvios no processo de fabricação, deixando alguns cabos fora do padrão. A utilização de um sensor adequado possibilita identificar a posição precisa de cada cabo de aço da correia manipulada no processo de emenda.

Neste caso, um sensor indutivo é empregado para identificar a profundidade e o espaçamento dos cabos de aço dentro da correia. O princípio de funcionamento do sensor é baseado na variação do campo eletromagnético no conjunto interno de bobina e circuito oscilador. A presença de corpos metálicos no *range* do sensor induz correntes parasitas que causam mudanças no campo eletromagnético, alterando a resposta do sensor. Os sensores indutivos podem possuir saída digital binária, para detecção de presença, ou saída analógica, que fornecem valores de tensão

ou corrente de acordo com a distância do sensor ao corpo metálico.

O movimento do braço robótico na modelagem interna acontece em uma varredura linear. Visto que os cabos possuem forma circular, durante o movimento, a saída do sensor analógico atinge um valor máximo, que representa o centro do cabo, e reduz até zero, indicando o fim da presença de objetos metálicos. Os sinais elétricos são convertidos em distâncias, ou profundidades $h(i)$, e combinadas com dados de posição cartesiana do braço para definir o espaçamento $d(i)$.

O modelo criado pode ser utilizado para validar uma emenda executada, fornecendo a posição dos cabos em seus respectivos estágios, e também no controle da ferramenta de corte definindo a profundidade de borracha a ser removida.

3.2 Remoção da Cobertura da Correia

O procedimento de remoção da camada de borracha da correia é um processo complexo, de difícil execução e atualmente realizado de forma manual. Para automatização do procedimento de emenda por completo, é crucial o estudo de formas para robotizar essa etapa do processo.

Este procedimento corresponde as etapas descritas nas Figuras 1.b e 1.c, sendo de extrema importância para um aumento na segurança operacional, visto que esta tarefa no procedimento manual é a que oferece um maior risco ao operador e tem maior ocorrência de acidentes devido a utilização da faca olfa.

A ferramenta de corte a ser utilizada é um conjunto de serras ASTRO II com 28 facas, amplamente empregada no processo de recapagem de pneus. Uma possível solução para robotizar o processo é utilizar a ferramenta de corte com um motor para acionamento, de forma que o conjunto possa ser acoplado ao braço manipulador.

Com a correia posicionada na plataforma de emenda, movimentos lineares devem ser realizados pela ferramenta de corte, de modo a pressionar a faca rotativa sobre a cobertura de borracha conforme a profundidade de corte para sua remoção. Do mesmo modo que no procedimento manual, após a operação deve existir uma pequena camada de borracha sobre os cabos, que auxiliará na adesão com a cobertura da correia durante a vulcanização.

4. SIMULADOR E INFRA-ESTRUTURA EXPERIMENTAL

Este artigo apresenta um simulador e bancadas de testes para validação conceitual e experimental de algumas das etapas do processo automatizado de emenda de correia transportadora.

4.1 Ambiente simulado

A simulação permite visualização, testes e validação de sistemas robóticos, evitando altos investimentos em protótipos reais. Visto que a emenda de correia automatizada é um processo inédito na Vale, o simulador possibilita uma experimentação de baixo custo gerando dados para fomentar a melhoria dos processos.

Robot Operating System O simulador desenvolvido tem a capacidade de emular manipuladores de diferentes fabricantes e para isso utiliza uma ferramenta de controle *open source*. O *Robot Operating System* (ROS) garante independência de softwares exclusivos e aumenta a capacidade de validação de ferramentas para o ambiente industrial (O’Kane, 2013).

O ROS é dividido em módulos, os pacotes ou *packages*, caracterizando um ambiente altamente versátil, cada um deles desempenhando funções especializadas. O ROS fornece funcionalidade para abstração de hardware, drivers de dispositivo, comunicação entre processos em vários equipamentos, ferramentas para teste e visualização e integração com diversos fabricantes de equipamentos. A estrutura permite suporte para várias linguagens de programação, agrupando as classes de comunicação C++, Python ou outras linguagens (Stanford Artificial Intelligence Laboratory, 2018).

Uma das principais vantagens do ROS é a forma como ele se comunica, permitindo a criação de softwares complexos sem conhecimento aprofundado sobre determinado hardware. Os processos, chamados de nós, são ligados a um controle centralizado, podendo ser executados em vários dispositivos e se comunicando por meio de receptores (*Subscribers*) e emissores (*Publishers*) de mensagens. O ROS possui suporte a várias plataformas e permite conexões entre processos em vários dispositivos (Koubaa, 2017).

O ROS Industrial é um projeto *open source* que estende as capacidades do ROS, possibilitando soluções avançadas com base em *hardware* e aplicações de escala industrial (Edwards and Lewis, 2012). Nomes relevantes no mercado de robôs industriais já possuem seus pacotes e interfaces de desenvolvimento. Empresas do mundo todo podem utilizar o ROS Industrial para o desenvolvimento de aplicações e softwares para seus robôs Comau Robotics, Kuka Robots e ABB Automation.

A interação com os manipuladores é realizada com auxílio do MoveIt!, extensão do ROS que consiste em uma plataforma de código aberto de fácil utilização para aplicações robóticas avançadas, incorporando os últimos avanços em planejamento de trajetórias, manipulação, percepção 3D, cinemática, controle e navegação. O pacote utiliza os planejadores da biblioteca (OMPL) (*Open Motion Planning Library*), que implementam diferentes algoritmos de planejamento de trajetória baseados em amostragem, que podem ser visualizadas no Rviz, ferramenta de visualização 3D do ROS framework.

CoppeliaSim Os ensaios são emulados num cenário implementado no CoppeliaSim, um software para simulações robóticas com ambiente de desenvolvimento integrado, baseado no controle individual de cada objeto por meio de script incorporado, plug-in ou nó do ROS (Rohmer et al., 2013). O CoppeliaSim possui integração com diferentes softwares, para que a adição de objetos seja abrangente, sendo possível importar modelos digitais 3D e arquivos de descrição de robôs.

Para a construção do cenário, o primeiro passo consistiu em gerar arquivos de configuração no MoveIt!, a partir de um modelo URDF (*Unified Robot Description Format*)

dos manipuladores, arquivo XML que descreve elementos do dispositivo, incluindo propriedades de cinemática, dinâmica, informações de juntas e links. O pacote criado no MoveIt! permite a interação direta com o robô por meio de uma interface gráfica e códigos de controle. O CoppeliaSim também possibilita a inserção dos manipuladores a partir do URDF, onde as ações executadas pelo MoveIt! são replicadas no ambiente de simulação por meio de um *plugin* de interface entre o CoppeliaSim e o ROS.

O CoppeliaSim também permite a integração com diferentes *engines* de física, incluindo o Bullet physics library, Open Dynamics Engine, Vortex Studio e Newton Dynamics.

Descrição da Cena Emulada O simulador proposto utiliza manipuladores dotados de sensores e controladores para a execução de algumas tarefas da emenda, representando o funcionamento de um sistema robótico de grande escala, e auxiliando na compreensão e identificação de possíveis problemas por parte da equipe de engenharia.

A cena apresentada na Figura 3 consiste em uma plataforma de emendas posicionada ao lado do transportador, contendo um gerador de energia, dois manipuladores robóticos montados em trilhos e seus controladores. Uma prensa de vulcanização é disposta no centro da plataforma.

O simulador conta com a versatilidade de utilização de diferentes modelos e fabricantes de manipuladores na execução das tarefas. Para as primeiras simulações, os modelos KR210 Titan da Kuka Robots e o IRB6650s da ABB estão posicionados em trilhos laterais à estação (Figura 3)

Inicialmente as ferramentas disponíveis são um sistema para modelagem de correias, equipado com um sensor LiDAR e um sensor indutivo, e uma ferramenta de corte de borracha. Os sensores utilizados na modelagem interna e externa são acomodados em uma ferramenta única acoplada ao manipulador, conforme ilustrado na Figura 4. A ferramenta possui forma de um elipsóide, com os sensores e seus respectivos eixos de medição defasados em um ângulo de 90°.

Para a remoção da cobertura da correia é utilizado uma ferramenta de corte rotativa acoplada a um braço manipulador com alcance e *payload* adequados. Tal ferramenta consiste num suporte mecânico, um motor para giro da faca e um sistema de transmissão de potência por correias, além da própria faca. O modelo proposto da ferramenta é apresentado na Figura 4.c.

4.2 Infraestrutura para Validação Experimental

A validação da automatização das etapas iniciais do processo de emenda de correias é realizada em duas bancadas instrumentadas montadas nas dependências do Instituto Tecnológico Vale (ITV).

Sistema Robótico para Modelagem de Correias O teste de conceito do sistema robótico para modelagem de correias é realizado utilizando um manipulador robótico IRB120 da ABB, com 6 graus de liberdade, *payload* de 3kg, e alcance horizontal de 580mm. Na flange do manipulador é acoplada uma ferramenta de modelagem composta por sensor LiDAR e sensor indutivo de saída analógica.

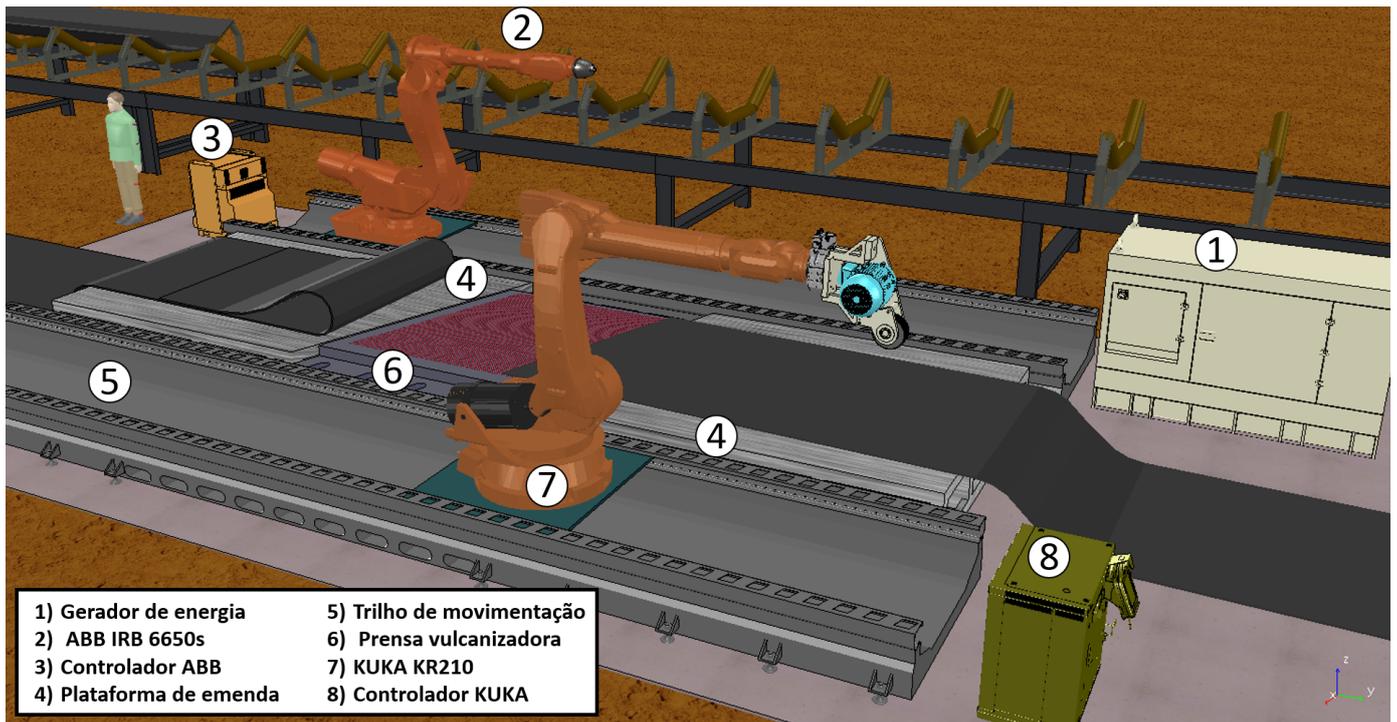


Figura 3. Ambiente simulado desenvolvido para o estudo do processo automatizado de emenda de correias.

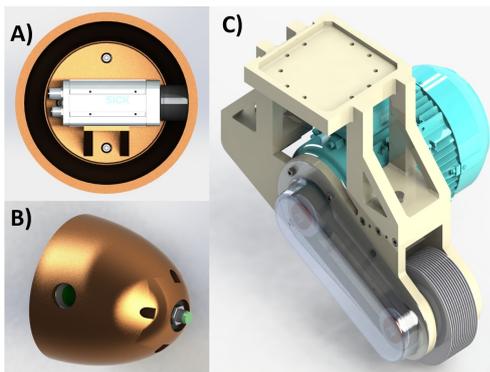


Figura 4. Ferramentas de modelagem e corte: (a) sensor de distância, (b) sensor indutivo e (c) sistema de corte.

Devido a disponibilidade no laboratório do ITV, foi utilizado um modelo RP LiDAR S1 de feixe rotativo, com campo de visão 270° e alcance de até 10m; no entanto, para o cálculo de distâncias lineares seria apenas necessário um único feixe fixo. A aquisição de dados do sensor é feito via ROS; a mensagem de interesse (*LaserScan*) contendo os dados de distância (*ranges*) é publicada no tópico *scan* do nó *rplidarNode* (Figura 5).

O sensor indutivo utilizado na bancada é de longo alcance, com *range* de detecção de 20mm. Os sinais elétricos do sensor durante o movimento do manipulador são gravados com o auxílio de uma placa de aquisição Arduino, ferramenta de controle de *hardware* livre e fácil programação. O sistema de aquisição e controle é composto pelo manipulador, um Arduino, o sensor e um computador com o ROS em operação (Figura 5).

O controle do robô é feito via um *socket* integrando o manipulador ABB ao ROS, permitindo o envio das trajetórias

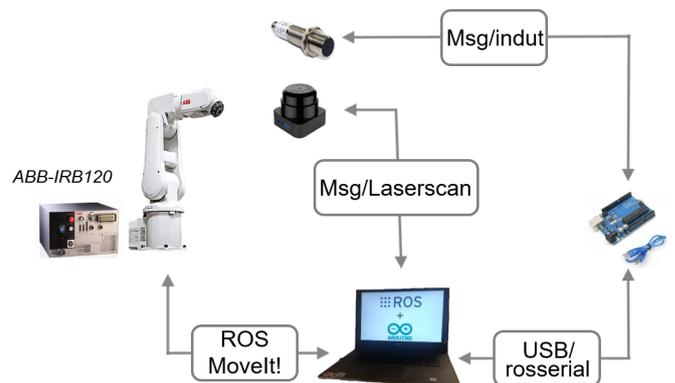


Figura 5. Bancada experimental para a verificação da modelagem da correia.

calculadas no MoveIt! ao controlador IRC5 Compact. A mensagem recebida pelo IRC5 Compact possui cabeçalho, dados de juntas e a duração da trajetória (Torre et al., 2018). A comunicação do ROS com a plataforma Arduino IDE é realizada por meio do pacote *rosserial*, que possibilita que o Arduino funcione como um nó. A placa de aquisição obtém os dados de leitura do sensor indutivo, registrando a informação por meio de mensagem (*indut*) no ROS, atuando como um *publisher*.

4.3 Bancada de Ensaio para Corte de Borracha

A tarefa de corte da borracha da correia envolve forças elevadas durante a execução, que são difíceis de estimar de forma precisa. Assim, foi desenvolvida uma bancada de testes para medir as forças que deverão ser suportadas pelo braço manipulador, facilitando na especificação de um robô adequado à tarefa.

Outro objetivo esperado com esse desenvolvimento é encontrar parâmetros de operação, como velocidade dos motores de corte e avanço e profundidade de corte, que maximizem o volume de borracha removido e minimizem o tempo de realização do processo.

A bancada foi desenvolvida com base num equipamento utilizado para raspagem no procedimento de recapagem de pneus. O equipamento é composto por um cabeçote com barras paralelas, que permite a movimentação horizontal do conjunto raspador (motor e faca), e uma mesa com movimentação linear, onde a amostra de correia é fixada. Este equipamento pode ser considerado como um robô cartesiano com 3 graus de liberdade, onde a posição horizontal do cabeçote e regulagem de altura da ferramenta são ajustados de forma manual, e o avanço da mesa móvel é feito de forma automática.

Para instrumentação do dispositivo e aquisição de dados, foram utilizadas duas células de carga para medirem esforços verticais, dois conversores de sinal e uma placa de aquisição para salvar os dados no computador. Os motores são comandados por inversores de frequência. Na Figura 6 é possível observar um esquemático da bancada de teste.

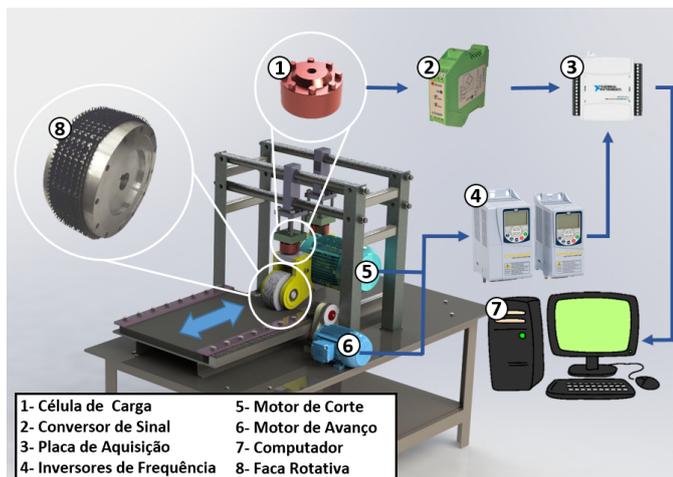


Figura 6. Bancada experimental para a verificação da remoção da cobertura de borracha da correia.

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As simulações do sistema robótico para emenda de correias possibilitam um estudo e análise geral do procedimento automatizado proposto, enquanto testes de bancadas permitem validar experimentalmente as ferramentas desenvolvidas para cada tarefa específica a ser realizada.

Durante as simulações, o controle dos manipuladores robóticos é centralizado no framework ROS, permitindo implementação posterior em dispositivos reais. Com base nos modelos cinemáticos, o MoveIt! realiza o planejamento de trajetórias livres de colisão e cálculo da ação de controle enviada aos manipuladores. Os manipuladores emulados no CoppeliaSim recebem comandos das juntas por meio de uma interface de comunicação com o ROS, e um controlador interno garante a execução das trajetórias planejadas.

Em determinadas etapas do procedimento, a ferramenta anexada ao manipulador deve realizar percursos cartesi-

anos pré-definidos, sendo necessária a execução de trajetórias lineares não contempladas pelos algoritmos de planejamento da biblioteca OMPL. Uma solução possível consiste na utilização da biblioteca Descartes Path Planning, conforme apresentado em (Rodrigues et al., 2019).

As simulações e experimentos utilizam com referência a correia transportadora modelo ST2500, uma das mais empregadas na Vale. Os testes de bancada foram realizados com segmentos desta correia com 520mm de largura e 29 cabos de aço internos. A seguir são descritos as simulações e os experimentos realizados, que também estão disponíveis online¹.

5.1 Modelagem da Correia

Durante a modelagem externa, o manipulador realiza movimentos lineares com o sensor LiDAR, conforme ilustrado na Figura 7.a e vídeo¹, possibilitando identificar a geometria de correias com diferentes larguras e espessuras de forma robusta e confiável. O sistema real utilizado nos testes de bancada é apresentado na Figura 7.b.

A modelagem interna da correia emprega a mesma estratégia de controle do manipulador, realizando movimentos lineares sobre a correia de forma que o sensor indutivo identifique a profundidade e espaçamento entre cabos de aço (Figura 7.c). Na bancada, a varredura com o sensor indutivo acoplado ao IRB120 sobre o trecho de correia indica a presença de cabos de aço (Figura 7.d). O sensor é integrado ao IRB120 por meio de uma ferramenta com sistema de amortecimento para garantir complacência ao toque da ponta na superfície da correia, evitando danos ao equipamento.

Os resultados de modelagem são obtidos combinando as leituras dos sensores LiDAR e indutivo com a pose do efetuador, calculada utilizando a cinemática direta mais a posição das juntas do robô. Considerando a precisão de cada equipamento, os erros associados às medições são na ordem de milímetros.

5.2 Remoção da Cobertura da Correia

O corte de borracha para a remoção da cobertura da correia é verificada por meio de simulações (Figura 7.e), onde o manipulador é controlado de forma que a direção de corte esteja alinhada com o comprimento da correia.

Para validação experimental da ferramenta de corte de borracha como uma opção viável para automatização do procedimento de emenda, foi construída uma bancada funcional para ensaios.

Até o presente momento, foram realizados testes preliminares para verificação do funcionamento dos sistemas de instrumentação, acionamento e aquisição de dados da bancada. A Figura 7.f apresenta o equipamento em funcionamento.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma proposta de sistema robótico para automatizar as etapas iniciais do processo de emenda

¹ <https://github.com/lsts91/Simulador-Emenda-de-Correias>

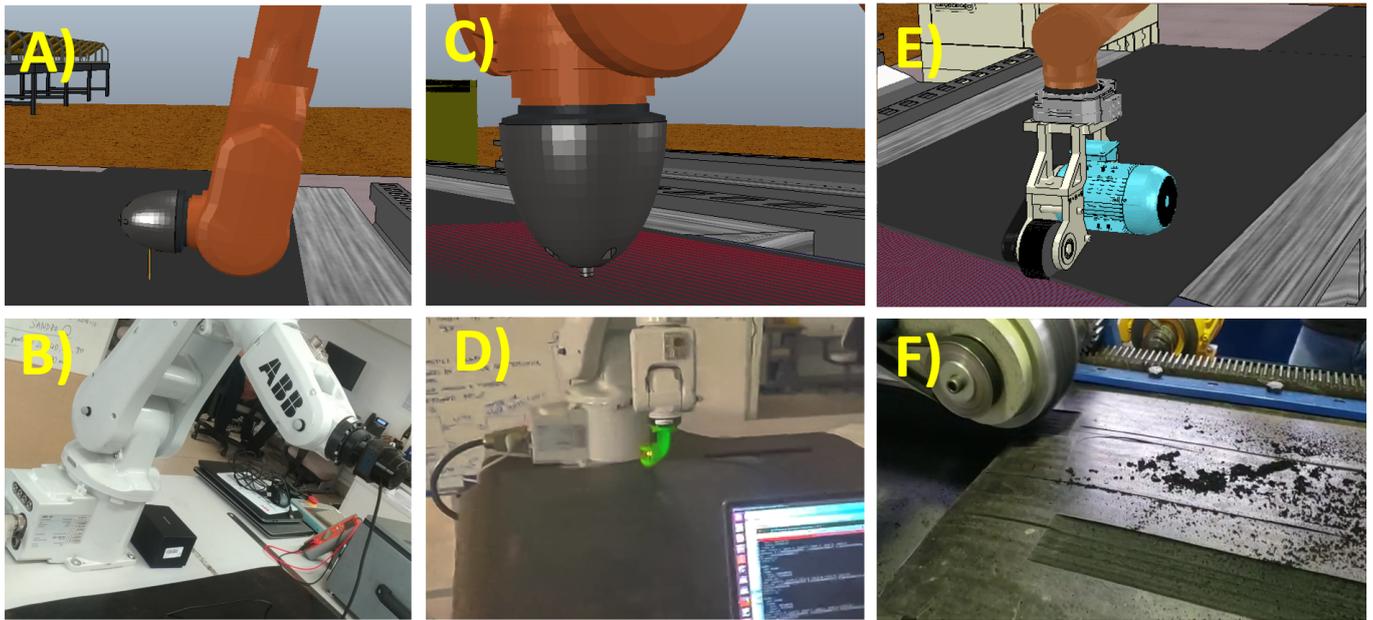


Figura 7. Verificação das etapas automatizadas de emenda de correia em ambiente simulado e bancadas experimentais.

de correias transportadoras, requisitando menos operadores envolvidos na tarefa e aumentando desta forma a segurança operacional. Além disso, a utilização de manipuladores robóticos pré-programados garante a padronização e qualidade do processo de emenda. O sistema proposto é validado através de simulações e experimentos de bancada.

A simulação dos procedimentos de emenda em ambiente virtual possibilita antecipar cenários, auxiliando na análise de segurança e manuseio de ativos. O simulador permite também a redução de custos com protótipos durante o desenvolvimento do sistema de emenda. Este pode ser considerado um primeiro passo para a implementação de um gêmeo digital, utilizado como suporte durante o planejamento e execução dos procedimentos de emenda.

Experimentos de bancada demonstram a viabilidade de utilizar um braço manipulador e sensores adequados para realizar a modelagem externa e identificação dos cabos de aço, assim como o emprego de uma ferramenta de corte na remoção da cobertura de borracha da correia.

Os resultados obtidos serão utilizados como referência no desenvolvimento e automatização de outras etapas do processo de emenda de correias. Para reproduzir esse projeto em escala industrial será necessário aumentar a robustez dos algoritmos de instrumentação, planejamento de trajetórias e controle de manipuladores.

REFERÊNCIAS

Bertayeva, K., Panaedova, G., Natocheeva, N., Kulagovskaya, T., and Belyanchikova, T. (2019). Industry 4.0 in the mining industry: global trends and innovative development. *E3S Web of Conferences*, 135, 04026.

Błażej, R., Jurdziak, L., Kirjanów, A., and Kozłowski, T. (2017). A device for measuring conveyor belt thickness and for evaluating the changes in belt transverse and longitudinal profile. *Diagnostyka*, 18(4), 697–102.

Edwards, S. and Lewis, C. (2012). Ros-industrial: applying the robot operating system (ROS) to industrial applica-

tions. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ECHORD Workshop*.

Garcia, G., Rocha, F., Torre, M., Serrantola, W., Lizarralde, F., Franca, A., Pessin, G., and Freitas, G. (2019). ROSI: A novel robotic method for belt conveyor structures inspection. In *2019 19th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR)*.

Koubaa, A. (2017). *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 2)*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition.

O’Kane, J.M. (2013). *A Gentle Introduction to ROS*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Qi, Q. and Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593.

Rodrigues, G.B., Domingues, J.D., da Silva, P.C., Ferraz, A.C., Gaigher, G., de Andrade, J.I., von Pritzelwitz, P., and Freitas, G. (2019). Estudo e testes conceituais de um sistema automatizado para emenda de correias transportadoras. In *Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.

Rohmer, E., Singh, S.P.N., and Freese, M. (2013). Coppeliassim (formerly v-rep): a versatile and scalable robot simulation framework. In *Proc. of The Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (I)*.

Stanford Artificial Intelligence Laboratory, S. (2018). Robotic operating system. URL <https://www.ros.org>.

Torre, M.P., Garcia, G.C., Freitas, G.M., Queiroz, S.S., de Oliveira Dias, M.S., and Souza, M.J.F. (2018). Desenvolvimento de um sistema para integração de células robóticas industriais com foco na Indústria 4.0. In *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Automática*.

Zaremba, D., Heitzmann, P., Overmeyer, L., Hillerns, L., and Hassel, T. (2017). Automatable splicing method for steel cord conveyor belts - evaluation of water jetting as a preparation process. *Journal of Mechanical Engineering*, (63), 590–596.