

ROBÓTICA NA MINERAÇÃO

Eduardo Cota¹

Marcos Paulo Torre¹

Jhony Alan Tavares Ferreira¹

Aline Xavier Fidêncio¹

Guilherme Brito Rodrigues²

Filipe Augusto Santos Rocha³

Héctor Aspúrua⁴

Gustavo Medeiros Freitas⁵

Wilson Miola⁶

Resumo

Graças à miniaturização e aumento na robustez de equipamentos eletrônicos, a robótica tem estendido as suas aplicações até às mais diversas áreas. Atualmente a mineração possui muitos desafios a serem resolvidos com soluções tecnológicas autônomas ou teleoperadas. Este trabalho aborda a descrição de algumas das técnicas e projetos do estado da arte da robótica que estão sendo aplicados em ambientes de mineração no Brasil e no mundo.

Palavras-chave: Robótica; Teleoperação; Automação; Mineração

MINING ROBOTICS

Abstract

Thanks to the miniaturization and robustness increase of electronic equipment, robotics has extended its applications to the most diverse areas. Today, mining has many challenges to be solved with technological solutions. This work addresses some of the state of the art robotics techniques and projects currently being applied in mining environments in Brazil and worldwide.

Keywords: Robotics; Tele-operation; Automation; Mining

¹ *Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Mestrando(a), Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

² *Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

³ *Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

⁴ *Mestre em Ciências da Computação, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

⁵ *Doutor em Engenharia Elétrica, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

⁶ *Doutor em Engenharia de Minas, Pesquisador titular, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade tradicional no Brasil, mas possui riscos para operadores humanos. Dado o grande número de tarefas repetitivas e perigosas, a mineração possui um enorme escopo para aplicações robóticas. Operações mineradoras requerem o manuseio de enormes quantidades de material de forma economicamente viável e segura. Altos custos operacionais, a necessidade de grande produtividade e melhores resultados de saúde e segurança impulsionam ainda mais o uso de robôs. As abordagens existentes para otimizar produtividade e segurança através de treinamento, práticas de trabalho e design de máquinas maiores têm retornado cada vez menos os investimentos aplicados. A indústria se aproxima de uma nova era, na qual robôs e automação irão ditar o futuro em termos de produtividade e segurança (Siciliano et al. [1]).

Apesar do enorme potencial, o emprego de dispositivos robóticos especializados em atividades que envolvam mineração ainda resulta em poucas aplicações práticas e de sucesso. Isso se deve ao fato de que as condições de operação oferecem aos equipamentos grandes dificuldades e riscos - tais como: altas temperaturas; excesso de umidade; poeira; solo irregular; exposição a riscos de queda e desabamento - que elevam os gastos de desenvolvimento, execução e manutenção. Além disso, considerando que a análise dos recursos de uma mina, que determina a sua rentabilidade, é um cálculo que pode variar, a introdução de novas tecnologias poderia oferecer riscos aos lucros da mineradora.

Mesmo diante das dificuldades encontradas, o aumento da necessidade de se produzir mais e da inaceitabilidade de acidentes humanos e danos ambientais, faz com que, atualmente, o investimento seja indispensável. Na literatura são sinalizados aumentos significativos de produção e segurança aplicando-se técnicas de automação. Por exemplo, tem se observado o aumento em 20% na produtividade através da automação aplicada a pás carregadeiras de minas subterrâneas (Load Haul Dump), e em outro caso, a automação de veículos carregadores efetivamente reduz custos de manutenção e aumenta continuidade de produção (Siciliano et al. [1]). Quase uma década depois, (Siciliano et al. [2]) salienta que as companhias mineradoras atuais têm renovado esforços em abordagens inovativas como solução para exploração de recursos naturais.

No Laboratório de Controle e Robótica do Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto-MG, são desenvolvidos projetos visando satisfazer as necessidades atuais de atividades mineradoras realizadas pela VALE. Neste artigo será abordado o estado da arte da robótica na mineração e serão detalhados alguns dos trabalhos de robótica aplicada na mineração realizados no laboratório.

O restante do texto se encontra dividido em: Seção 2, na qual serão descritos alguns dos trabalhos de robótica mais relevantes na área de mineração; Seção 3, são detalhados alguns dos trabalhos relevantes desenvolvidos dentro do Brasil; Seção 4, onde são descritos os projetos robóticos realizados no Instituto Tecnológico da Vale (ITV); e finalmente Seção 5, onde são mostradas as considerações finais e ideias futuras.

2 ESTADO DA ARTE

No trabalho de Singh [3], o estado da arte da automação aplicada a equipamentos relacionados à mineração, como: tratores, escavadeiras e carregadeiras, era apontada apenas como uma tendência. Duas décadas depois, a tendência se confirma e as aplicações de automação e robótica na mineração se fazem cada vez mais necessárias para empresas que querem atingir metas em um mercado globalizado.

Saúde e segurança é um tema recorrente no ramo da mineração. Mesmo que o número de fatalidades tenha sido reduzido consideravelmente, segundo o MSHA [4], somente em 2016, 25 pessoas morreram em atividades mineradoras nos EUA. O ambiente de mineração sempre oferecerá riscos ao homem, mas as atividades de exploração precisam continuar para suprir as necessidades das indústrias de todo o mundo. Uma maneira óbvia de garantir que não haverá danos ao homem é retirar todo o contingente humano das áreas de operações perigosas. Com este intuito, muitos investimentos em atividades teleoperadas e autônomas têm sido realizados.

2.1 Teleoperação

Na mineração, é muito comum a utilização de explosivos para o desmonte de rochas. Este procedimento é necessário para que a rocha seja fragmentada em tamanhos que seja possível o carregamento e transporte com os atuais equipamentos. Após o processo de desmonte, porém, permanecem alguns fragmentos com tamanhos não desejáveis. Visando corrigir este problema, Duff et al. [5] desenvolveram um sistema robótico teleoperado para quebrar estes fragmentos em tamanhos menores para adequá-los ao processo de transporte.

O objetivo do trabalho é demonstrar a viabilidade da implementação de um sistema de controle aplicado a longas distâncias considerando efetividade e segurança. Além de não expor o operador do equipamento ao ambiente hostil de operação, a teleoperação pode causar aumento da produtividade pelo não deslocamento do mesmo até o local de fragmentação de rocha. Inserir o operador neste local de forma virtual é um desafio pela limitação dos sensores e câmeras. Como o máximo de informações auxilia em uma melhor tomada de decisão, utilizou-se uma abordagem híbrida que envolve o uso de visualização direta através de câmeras e visualização sintética através do uso de sensores e computação gráfica. Os testes realizados apresentaram resultados positivos. Com apenas meia hora de interação com o sistema de controle, o operador foi capaz de quebrar pedaços de rocha a quilômetros de distância. Apesar do sucesso, algumas considerações foram registradas em relação à dificuldade de operar com grandes fragmentos; a problemas de concentração devido ao alto número de telas e às limitações da representação do ambiente real.

O processo de carregamento de explosivos pode ser caracterizado como perigoso simplesmente pela potencial destruição causada pelos mesmos. Tendo como objetivo a minimização dos riscos e dificuldades desta atividade, Bonchis et al. [6] desenvolveram e testaram um sistema robótico para a execução do carregamento de explosivos. O dispositivo possui sistema de detecção de furos, onde são carregados os explosivos; e opção de posicionamento do braço automático ou teleoperado. Devido às limitações das funções automáticas, a opção

teleoperada se faz necessária.

De acordo com Hayashi et al. [7], a performance da teleoperação é limitada em relação à operação direta, por razão da perda de consciência e sensibilidade causada pelo ambiente remoto. Para tentar compensar essa lacuna, foi proposto o desenvolvimento de um *feedback* tátil para a teleoperação de uma escavadeira. Neste sentido, foi desenvolvida a função de vibração do controle à medida que a pá do equipamento se aproxima do chão. Dessa forma, a falta de sensibilidade causada pela ausência de sentidos do ambiente real é diminuída com informações adicionais da posição do equipamento.

2.2 Operação autônoma

A evolução dos sistemas teleoperados seriam os sistemas autônomos. A grande diferença é dada pelo fato de que um sistema considerado autônomo é preparado para tomar decisões sem a necessidade da intervenção humana. Ou seja, o sistema possui percepção e é equipado com atributos suficientes para realizar uma decisão de acordo com as informações adquiridas. Segundo Larsson et al. [8], apesar do enorme potencial para se aumentar produtividade e segurança, os sistemas completamente autônomos nem sempre são aplicáveis ou economicamente viáveis. Considerando isso, foi implementado um sistema de autonomia local (aplicada apenas na fase de transporte) em um equipamento teleoperado, utilizado para carregamento e transporte de minério e estéril em minas subterrâneas.

A ideia de se aplicar autonomia local tem como intenção o aumento da velocidade de transporte, visando uma maior produtividade; a redução da latência, visto que menos comandos de controle seriam enviados; e a diminuição de colisões devido à diminuição da carga cognitiva sobre o operador, o que reduz custos de manutenção. A avaliação da eficiência do trabalho foi feita por meio da medição o tempo gasto para a locomoção do equipamento e a contagem do número de incidentes ocorridos durante a locomoção, com e sem o uso das novas implementações.

Os resultados se mostraram positivos e nenhum dos incidentes ocorridos foi registrado durante locomoção por autonomia local. Além da segurança ocasionada, a autonomia resultou em tempos menores de operação (para locomoção reta), inclusive se comparado à operação na qual o operador está embarcado. Dessa forma, a autonomia, apesar de local - aplicada somente na fase de transporte, se mostrou uma alternativa clara para o aumento de produtividade, segurança e a redução de custos para o transporte de materiais em minas subterrâneas.

Outro exemplo de sucesso da aplicação de autonomia em atividades mineradoras é apresentado por Jordan [9]. Caminhões com capacidade de 330 toneladas, usados para transporte de estéril e minério no deserto mais seco do mundo - o Atacama, no Chile - operam de forma autônoma sem qualquer intervenção humana durante a locomoção do equipamento. Bellamy et al. [10] apresentam uma avaliação da utilização de veículos semelhantes em minas na Austrália. Em um comparativo realizado, é mostrada a diferença de ociosidade de um equipamento autônomo e operado: o veículo autônomo opera o equivalente a 22 dias a mais por ano que o operado. Dessa forma, é nítido o aumento da produtividade e a redução de custos atingida. Os autores ainda destacam que minas anteriormente definidas como economicamente inviáveis poderão ser reativadas

com os recursos financeiros economizados com o uso de veículos autônomos.

De acordo com Henderson et al. [11], a empresa Rio Tinto já utiliza uma frota de caminhões inteiramente autônomos no oeste da Austrália. Segundo Rio Tinto Media [12], a frota de caminhões autônomos já moveu 300 milhões de toneladas em Pilbara, Austrália. Com uma frota de 53 veículos autônomos percorreu-se quase quatro milhões de quilômetros em Yandicoogina, Nammuldi e Hope Downs 4, também na Austrália.

3 MINERAÇÃO E ROBÓTICA NO BRASIL

O Brasil possui algumas das maiores reservas de minérios do mundo e dispõe de uma indústria de mineração muito ativa. A mineração é vista como uma das indústrias mais maduras da região, mas devido ao grande custo operacional e humano envolvido na adaptação de tecnologias de automação e robótica dentro da mina ou porto, o Brasil ainda se encontra explorando o que as novas tecnologias podem acrescentar nos processos tradicionais de extração, processamento, inspeção, e monitoramento. Para as mineradoras, novas tecnologias representam uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança Mesquita et al. [13].

No Brasil, a empresa Vale já utiliza diferentes robôs em suas operações, que visam padronizar e aumentar a eficiência dos processos, assim como reduzir custos e riscos para seus empregados. Os sistemas robóticos são usados na montagem, manutenção e limpeza de equipamentos de mineração, além da preparação e manipulação de amostras durante ensaios laboratoriais.

Esses dispositivos estão presentes, por exemplo, na limpeza de caminhões fora de estrada (Figura 1 (a)). São veículos com altura de um prédio de dois andares e um tanque que comporta 4,5 mil litros de óleo diesel. As dimensões de um gigante como este tornam a limpeza manual uma tarefa perigosa para os empregados. O lavador de caminhões de Carajás emprega dois robôs industriais, um em cada lateral do lavador, que se locomovem por até 19 metros de trilhos e alcançam 4,5 metros de altura, movimentando-se conforme a programação definida. Com a tecnologia e a padronização, o serviço ganhou em produtividade e, ao mesmo tempo, reduziu impactos ambientais. Cerca de 80% da água é reutilizada no processo.



Figura 1 - Automação na mina: (a) Lavador de caminhões robotizado e (b) recomposição de chapas de vagões.

Outro exemplo da utilização de sistemas robóticos na Vale é o da recomposição de chapas de vagões que circulam na Estrada de Ferro Carajás (EFC) (Figura 1 (b)). Como na linha de montagem da indústria automobilística, o sistema usado na EFC é composto de braços mecânicos capazes de realizar o corte e a solda de placas de aço carbono presentes na lateral dos vagões. Na fase manual da atividade, a troca de chapas de apenas um vagão era realizada em 48 horas. Com o robô, é possível fazer a manutenção de dois vagões em 22 horas.

Na oficina mecânica de pelletização em Vitória, um braço robótico realiza o serviço de montagem de barras de grelha. Cada carro de grelha é formado por 360 barras, cada uma pesando cinco quilos. O emprego do robô no serviço mais pesado resultou na redução imediata de 20% a mão de obra nessa atividade, permitindo aos empregados se dedicarem a outras atividades relacionadas à manutenção. Com isso, a média diária de manutenção dos carros de grelha dobrou. Na usina de pelletização 8, também em Vitória, um robô é usado no controle de amostragem das pelotas. Com este equipamento, foi possível aumentar a segurança operacional, reduzir a quantidade de equipamentos envolvidos no processo e diminuir a movimentação do material até a área de testes.

Em Carajás (PA), o Laboratório de Preparação e Ensaios Físicos também possui uma célula robótica capaz de realizar testes para determinação da granulometria do minério de ferro com mais segurança e confiabilidade. Basta o técnico alimentar o robô com o minério e programar o ensaio para que o equipamento selecione a peneira, realize as pesagens, peneiramento e envie os dados consolidados para um banco de dados. Já o laboratório de Itabira (MG) consiste num sistema composto por quatro células robotizadas, onde são preparadas e manipuladas amostras prensadas e fundidas para análises químicas de mineração. Esta robotização melhorou as condições de segurança e produtividade das análises. No Laboratório de Ensaios Físicos de Vargem Grande (MG), um robô manipula amostras de minérios entre esteiras, pulverizadores, britador e estufa. O sistema robótico é utilizado para aumentar a padronização e eficiência do processo.

4 DESENVOLVIMENTOS DO INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

Esta secção descreve algumas das tecnologias e trabalhos de robótica mais relevantes sendo desenvolvidos atualmente no Instituto Tecnológico Vale, os quais são diretamente aplicados como soluções de mineração.

4.1 Atividades com manipuladores robóticos

A maioria dos robôs industriais utilizam *softwares* proprietários e controladores nativos, de arquitetura fechada, fazendo com que a integração com dispositivos de fabricantes diferentes, algoritmos e sensores se torne uma tarefa difícil de ser feita diretamente. Segundo Bartolomeu et al. [14], um dos grandes desafios da robótica é justamente como integrar as informações vindas de todos estes algoritmos e sensores, de modo a gerar comandos e controlar os diferentes dispositivos de atuação do robô, garantindo que a tarefa seja executada de modo correto e sem colocar em risco tanto o robô quanto aqueles que o cercam.

Uma possível solução para o problema de integração é a implementação do controle dos equipamentos à partir de um sistema unificado, possibilitando tomadas de decisão mais adequadas e cruzamento de informações. Além disso, um sistema unificado permite dar mais flexibilidade à aplicação, pois diversos tipos diferentes de algoritmos para interagir com o sistema podem ser aplicados de maneira mais simples, como de otimização, tratamento de imagens e visão computacional.

Desta forma, foi introduzida a utilização do sistema ROS, uma ferramenta flexível para implementação de *softwares* para robôs, apresentando uma coleção de ferramentas, bibliotecas e convenções, geralmente escritas nas linguagens de programação C++ ou Python (ROS [15]). O manipulador robótico utilizado para a prova de conceito foi o IRB 120 da ABB, cujo controlador é o IRC5 Compact. Ele utiliza a mesma linguagem de programação dos braços robóticos de grande escala presentes atualmente na Vale. Dessa forma, toda modificação realizada pode ser transferida de igual maneira para os sistemas robóticos que estão em operação.

O desenvolvimento deste projeto consiste em controlar totalmente o braço robótico através do ROS, utilizando uma ferramenta para planejamento de trajetórias chamada MoveIt!. O robô pode ser posicionado através de uma interface gráfica interativa, onde é possível definir pontos dentro do espaço de trabalho do robô e a melhor trajetória entre o ponto inicial e final é calculada. Outra funcionalidade que pode ser desenvolvida através desta integração é o desvio de obstáculos. Na Figura 2 é mostrado um objeto verde incorporado à cena e o caminho feito pelo manipulador para evitar a colisão com o objeto. O próprio *software* identifica a colisão com o obstáculo e calcula a melhor trajetória para que o desvio ocorra.

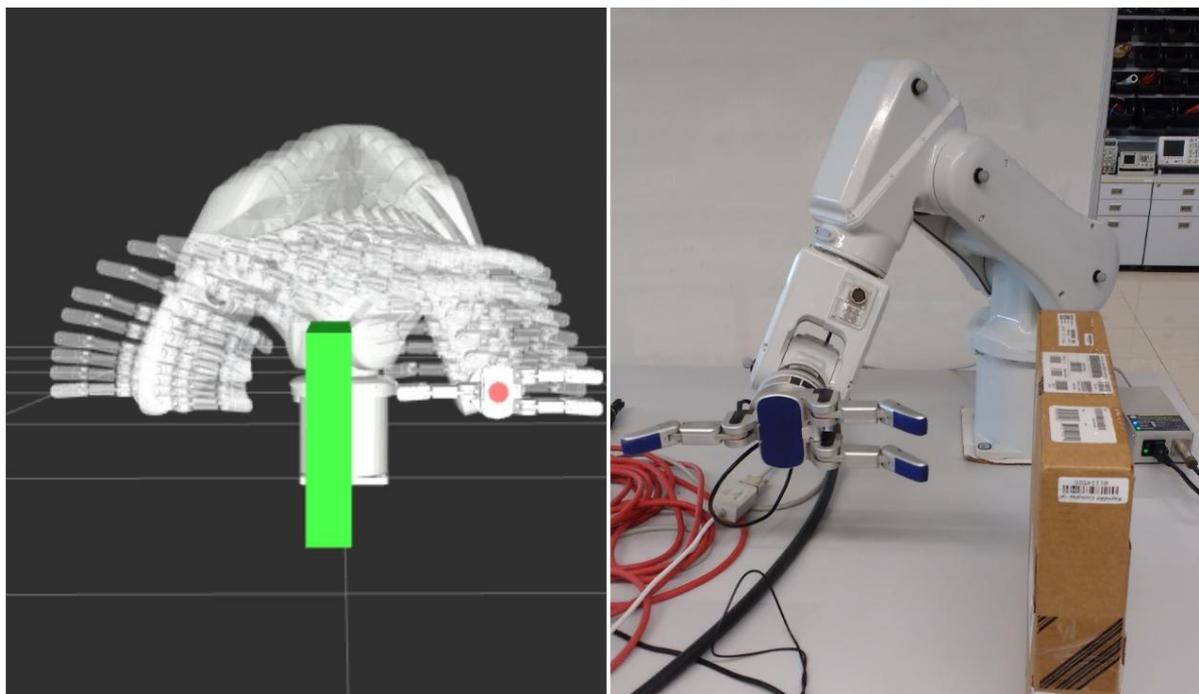


Figura 2 - Trajetória planejada com desvio de obstáculo e pose final executada pelo robô real.

O método abordado apresenta grande flexibilidade e robustez, devido ao sistema ser centralizado no *framework* ROS. Apesar de sua flexibilidade, este método exige uma grande reformulação no sistema da célula robótica que receberá a aplicação. Para projetos de novas plantas, seu uso deve ser considerado, pois

facilitará, no futuro, a integração com novos dispositivos e sistemas.

4.2 Robô de exploração de cavidades

É recorrente nas áreas de exploração mineral o descobrimento de cavidades naturais. Por questões legais e ambientais, não é permitido explorar economicamente estas áreas sem antes haver catalogação do ambiente. A investigação então é crucial para viabilizar a extração mineral em regiões onde há cavidades. Os espeleólogos são os cientistas especializados em realizar estas explorações, entretanto, cavidades naturais podem ser ambientes hostis e perigosos.

Com iniciativa da área de espeleologia da Vale, e tendo em vista a segurança dos colaboradores, está sendo desenvolvido no Instituto Tecnológico Vale (ITV) um robô com o intuito de realizar o mapeamento de cavidades. Os operadores podem utilizar os dados coletados para analisar antecipadamente os riscos do ambiente.

Conhecido como EspeleoRobô, este dispositivo é inspirado no robô hexápode RHex (Boston Dynamics [16]). Devido à heterogeneidade dos terrenos que podem ser encontrados em cavidades naturais é usada locomoção mista entre rodas e pernas dependendo da situação (Figura 3). Os modos de locomoção podem ser alterados mediante um sistema de troca rápida desenvolvida especialmente para o robô.

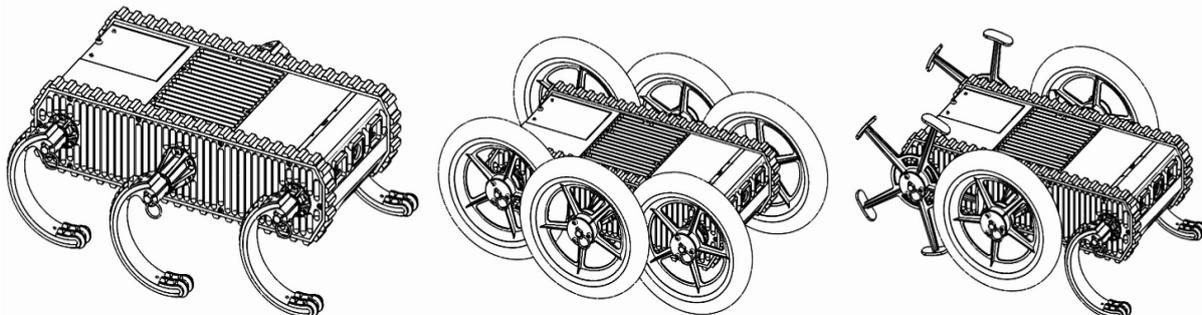


Figura 3 - Configurações de locomoção do EspeleoRobô hexápode original, apenas com rodas e híbrida, respectivamente.

Mecanicamente, o protótipo do robô desenvolvido é constituído de peças em poliacetal e alumínio; materiais de baixa densidade. A comunicação com a base de operações é realizada através do rádio *wireless* digital Ubiquiti Rocket M900. Há seis motores CC para acionamento de cada eixo do robô, separadamente. A comunicação com estes é realizada através de barramento CAN. O computador central de controle do robô é um Intel® NUC de alto desempenho. Toda a programação do dispositivo foi feita utilizando ROS.

O robô já foi a campo em diferentes tipos de terreno. Na mina da Passagem (Mariana-MG) foram testadas a locomoção e, principalmente, a comunicação em ambientes subterrâneos; foi atingida a marca de 175m de comunicação sem fio em ambiente confinado. Em parceria com a prefeitura de Ouro Preto, o robô foi levado a uma mina abandonada em área de risco (Figura 4(a)). Mesmo com solo lamacento e com filetes d'água, o dispositivo demonstrou boa mobilidade e funcionamento. Mais recentemente o EspeleoRobô foi levado para inspecionar a galeria da barragem do

Rio do Peixe, Itabira-MG (Figura 4(b)). Foram obtidas inclusive imagens com luzes infravermelhas do interior da galeria.



(a) Mina abandonada localizada em área de risco, Ouro Preto-MG



(b) Barragem de Rio Peixe, Itabira-MG

Figura 4 - Testes de campo

Apesar de ter sua concepção focada na exploração de cavidades, o robô já se mostrou polivalente para investigar outros tipos de ambientes. Sua flexibilidade no modo de locomoção utilizado permite que este seja usado nos mais variados tipos de terreno, sejam eles confinados ou não. O EspeleoRobô se mostra então uma ferramenta já concebida muito relevante quando há a necessidade de explorar um ambiente onde o ser humano não possa, ou não deva, ir.

4.3 Teleoperação de equipamentos de mineração

Dentre os diversos equipamentos de mineração aos quais as técnicas de teleoperação são aplicadas, as escavadeiras são uma aplicação potencial. No processo de transporte, estes equipamentos são os mais utilizados para movimentação do material até caminhões ou outros mecanismos de transporte. Devido às dificuldades técnicas em se obter uma escavadeira verdadeiramente autônoma, as técnicas de teleoperação tem sido extensivamente aplicadas com o objetivo de se otimizar tal operação (Moon et al. [17]; Yusof et al. [18]).

No ITV, a aplicação da teleoperação à escavadeira está sendo investigada por meio da realização de testes de conceito em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel equipada com um braço robótico e diversos equipamentos sensores. O objetivo é analisar que tipo de informação efetivamente contribui para que a teleoperação mais eficiente, eficaz e segura. Para tal, um sistema de teleimersão está sendo desenvolvido. Este sistema permitirá a interação entre o operador (sistema local) e a plataforma robótica (sistema remoto). O sistema local utilizará um óculos de realidade virtual e uma plataforma robótica móvel Seekur Jr. equipada com um braço manipulador Schunk Powerball de seis graus de liberdade contendo um sensor de força e torque no efetuador, sendo capaz de representar e operar de maneira similar a equipamentos da mineração.

O Seekur Jr. integra uma série de dispositivos: Câmera PTZ RVision SEE, Câmera estéreo MobileRanger C3D, Laser range finder SICK LMS-111 e IMU. Os sensores visuais fornecerão as imagens até o operador usando óculos de realidade virtual com a finalidade de aumentar a imersão. Os dispositivos hápticos serão utilizados para prover ao operador uma sensação mais realista de todas as

interações mecânicas entre o equipamento teleoperado e o meio.

Dois dispositivos hápticos são utilizados: um Novint Falcon e um Phantom Omni. O Falcon será utilizado para comandar a locomoção do robô. Com isso, será possível realimentar para o operador a informação caso o robô esteja, por exemplo, prestes a atingir um obstáculo, de tal forma que, caso o operador insista em direcionar o robô no sentido do obstáculo, ele literalmente sinta resistência no dispositivo háptico. Enquanto que o Phantom será utilizado para comandar o manipulador robótico e a possibilidade de realimentação de informações de colisão também se aplicará a este caso, considerando-se que o manipulador robótico integra em seu efetuator um sensor de força e torque através do qual as informações sobre as forças externas atuando sobre o mesmo serão obtidas. Os dados coletados pelo laser presente na plataforma robótica serão utilizados para o mapeamento do ambiente onde o equipamento teleoperado se encontrará. Esta informação, ao ser transmitida para o operador, irá aprimorar sua capacidade de visualização do ambiente remoto e poderá ser utilizada na definição do caminho a ser percorrido pelo equipamento e na detecção de possíveis obstáculos a serem transpostos.

Na Figura 5 é mostrado o ambiente no qual testes preliminares de locomoção foram realizados, destacando a separação física entre o operador e a plataforma robótica teleoperada.



(a) Ambiente local (operador)

(b) Ambiente remoto (robô)

Figura 5: Ambiente de realização de testes

Assim, é esperado que os resultados experimentais apontem para uma forma eficaz de se construir um ambiente de teleoperação que permita ao operador uma sensação o mais realista possível ao interagir com o ambiente remoto e o equipamento teleoperado.

4.4 Carregamento de explosivos

Uma das atividades que envolvem alto risco na mineração é o carregamento e detonação de explosivos. Nós propomos uma possível solução aos riscos da atividade, através do carregamento autônomo de explosivos na região de desmonte de minério usando robôs móveis.

Tradicionalmente, o carregamento de explosivos requer uma equipe especialista que, na região de desmonte, insere uma mangueira no furo de detonação para carregar os explosivos através de uma bomba. Essas atividades, que normalmente seriam executadas pela equipe treinada, seriam futuramente realizadas por uma plataforma móvel equipada com um braço manipulador.

A plataforma móvel utilizada é também o Seekur Jr. A emulação do

carregamento de explosivos executada pela plataforma proposta é dividida em 3 etapas: (i) Navegação até a região do furo, localização e inserção da mangueira no furo. A navegação autônoma até a região do furo é realizada através de técnicas de mapeamento e localização simultâneas (SLAM) e algoritmos de planejamento de trajetória (Dijkstra e Trajectory Rollout); (ii) A localização do furo é feita através de processamento de imagens (detecção de círculos e elipses) adquiridas por uma câmera estéreo; (iii) E, por último, com a posição do furo calculada, o braço manipulador utiliza algoritmos de busca em árvores (RRT) para planejar uma trajetória e projetar o braço sobre o furo (Figura 6).

O sistema foi avaliado em ambientes controlados de laboratório mostrando a factibilidade da aplicação deste tipo de tecnologia em ambientes de mina. Futuros experimentos serão realizados em ambientes reais, com o uso de sensores mais robustos para a adequação ao ambiente.

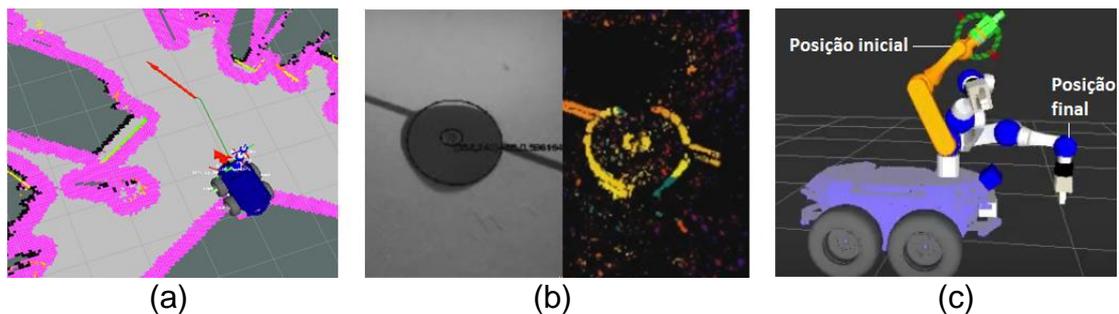


Figura 6: Emulação do carregamento de explosivos: (a) mapeamento e navegação autônoma, (b) detecção do furo, (c) posicionamento do manipulador sobre o furo

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma visão geral sobre o estado da arte da robótica na mineração no mundo, e especificamente um conjunto de alguns dos trabalhos mais relevantes sendo desenvolvidos na mineração no Brasil. Muitos dos problemas abordados pela robótica na mineração tratam sobre segurança e aumento da eficiência. Existe o uso de robôs teleoperados, semi-autônomos e autônomos, diminuindo o risco de operadores. Ao redor do mundo temos uso de veículos de transporte totalmente autônomos funcionando praticamente 24h/dia e sistemas de controle robustos que gerenciam e controlam todo o movimento do minério, desde a sua extração na mina até o envio final no porto. O uso de robótica de manipuladores é muito estendido para tarefas altamente repetitivas ou perigosas como troca de pneus de caminhão ou posicionamento de barras de metal, o que traz uma grande vantagem em segurança para os operadores.

Também foram mostradas as dificuldades de implantação das novas tecnologias em ambientes difíceis como a minas a céu aberto ou portos, onde: poeira, alta temperatura, excesso de umidade e dificuldade de acesso, tornam a tarefa de automatização um grande desafio tecnológico.

Embora a robótica esteja avançada o suficiente para resolver alguns dos problemas clássicos da mineração como transporte, monitoramento, inspeção e segurança, o Brasil ainda é uma região onde existem muitos desafios a serem resolvidos devido à grande oportunidade de inserção de tecnologias novas. Com a

abertura das empresas ao uso de novas tecnologias e aumento dos investimentos em pesquisa dentro da mina, o uso da robótica para suporte das operações será comum nos próximos anos, sendo ele um dos pilares da Mineração 4.0.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, Vale S.A e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer handbook of robotics**. Springer, 2008.
- 2 SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer handbook of robotics**. 2ª. Springer, 2016.
- 3 SINGH, Sanjiv. State of the art in automation of earthmoving. **Journal of Aerospace Engineering**. 1997; v. 10, n. 4, p. 179-188.
- 4 United States Department of Labor: Mine Safety and Health Administration. ALL MINING FATALITIES BY STATE by CALENDAR YEAR 2017. 2017 [acesso em 12 jun. 2017]. Disponível em: <https://arlweb.msha.gov/stats/charts/allstates.pdf>.
- 5 DUFF, Elliot et al. The development of a telerobotic rock breaker. In: **Field and Service Robotics**. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 411-420.
- 6 BONCHIS, Adrian et al. Robotic explosive charging in mining and construction applications. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. 2014; v. 11, n. 1, p. 245-250.
- 7 HAYASHI, Kouki; TAMURA, Takayuki. Teleoperation performance using excavator with tactile feedback. In: **Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on**. IEEE, 2009. p. 2759-2764.
- 8 LARSSON, Johan; BROXVALL, Mathias; SAFFIOTTI, Alessandro. An evaluation of local autonomy applied to teleoperated vehicles in underground mines. In: **Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on**. IEEE, 2010. p. 1745-1752.
- 9 JORDAN, Pav Jordan. Chile's new Gaby copper mine steps into the future. Reuters. 2008. [acesso em 10 jun. 2017]; Disponível em: <http://uk.reuters.com/article/chile-codelco-gaby-idUKN2133325020080521>.
- 10 BELLAMY, Drew; PRAVICA, Luka. Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. **Resources Policy**. 2011. v. 36, n. 2, p. 149-158.
- 11 HENDERSON, Jason; SPENCER, Jason. Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate. **Cornell Real Estate Review**. 2016 v. 14, n. 1, p. 14.
- 12 Rio Tinto Media. Rio Tinto improves productivity through the world's largest fleet of owned and operated autonomous trucks. 2014 [acesso em 12 jun. 2017]. Disponível em: http://www.riotinto.com/media/media-releases-237_10603.aspx.
- 13 MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L. de; OGANDO, Laura Duarte. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. 2016. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n. 43.
- 14 BARTOLOMEU, Paulo et al. Integração de Informação na equipa de Futebol Robótico CAMBADA. **Electrónica e Telecomunicações**. 2005. v. 4, n. 4, p. 467-477.
- 15 ROS. 2013 [acesso em 22 jan. 2017]; Disponível em: <http://www.ros.org/about-ros/>
- 16 RHEX, Boston Dynamics. 2017. [acesso em 30 jan. 2017]. Disponível em: http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html.
- 17 MOON, S. M. et al. Development of tele-operation control station for intelligent excavator. **IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications**, 2009. p.123-128.
- 18 YUSOF, Ahmad Anas et al. Modern practical application and research on teleoperated excavators control, feedback and perception issues in post disaster recovery operation. In: **Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), 2015 IEEE International Symposium on**. IEEE, 2015. p. 179-185.