

# IMPLANTAÇÃO DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA AUTÔNOMOS NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO\*

Gabriel Arthur Guieiro<sup>1</sup>  
Emylle Alves Leitão<sup>2</sup>  
Emerson Sena Balbino<sup>3</sup>  
Lucas van Melis<sup>4</sup>

## Resumo

A implantação de caminhões autônomos na mineração provoca mudanças em toda produção, sendo necessária uma gestão de mudanças adequada para que os benefícios gerados no uso dessa tecnologia possam ser observados e garantam a adaptabilidade da organização a longo prazo. Neste trabalho é apresentada a tecnologia implantada nos caminhões autônomos usado no processo de extração de minério na mina de Brucutu, da Vale, as mudanças que os profissionais de operação enfrentam com a adoção da tecnologia autônoma, desde treinamentos até adequação de procedimentos necessários devido à sensibilidade do sistema de transporte autônomo, e a nova dinâmica operacional do ponto de vista do processo, com operações mais seguras, consistentes e produtivas.

**Palavras-chave:** Sistema de Transporte Autônomo; Tecnologia autônoma; Gestão de mudanças

## DEPLOYMENT OF AUTONOMOUS HAULAGE TRUCKS IN THE MINING INDUSTRY

### Abstract

The deployment of autonomous haulage system causes several impacts in mining production chain, being necessary an appropriate change management policy, crucial to observe and gather all the benefits brought by the technology. The change management is also necessary to guarantee the adaptability of the organization in the long term. This paper briefly presents the technology deployed in the autonomous trucks at Vale's iron ore Brucutu mine, the changes that the operation team faces in the adoption of autonomous technology and the required training path to develop new procedures to deal with the sensitivity of the autonomous haulage system, besides the new operational dynamics from a process point of view, with safer, more consistent and more productive operations.

**Keywords:** Autonomous Haulage System; Autonomous technology; Change management.

- <sup>1</sup> Eng. Controle e Automação UFMG, Engenheiro Sênior, Ger. Engenharia e Desenvolvimento Plano Diretor de Tecnologia Operacional, Vale S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- <sup>2</sup> Eng. Controle e Automação UFMG, Estagiário, Ger. Engenharia e Desenvolvimento Plano Diretor de Tecnologia Operacional, Vale S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- <sup>3</sup> Eng. Eletrônica e Telecomunicações, Mestrado Eng. Elétrica, PUC Minas, Engenheiro Especialista, Gerência de Implantação de Projetos Estratégicos de Tecnologia Operacional, Vale S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- <sup>4</sup> Eng. de Minas UFOP, Engenheiro Sênior, Ger. TI Inovação Industrial, Vale S.A., São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Empresas do ramo de mineração vêm buscando formas de otimizar e tornar mais eficiente suas operações de maneira a atender a demanda do competitivo mercado de commodities. O desenvolvimento de tecnologias e novos instrumentos de produção foram determinantes para as revoluções industriais que provocaram mudanças no contexto produtivo, iniciado no século XVIII com o aprimoramento de máquinas a vapor, aprimorado com o uso de energia elétrica até alcançar a integração entre ciência e produção na terceira revolução.

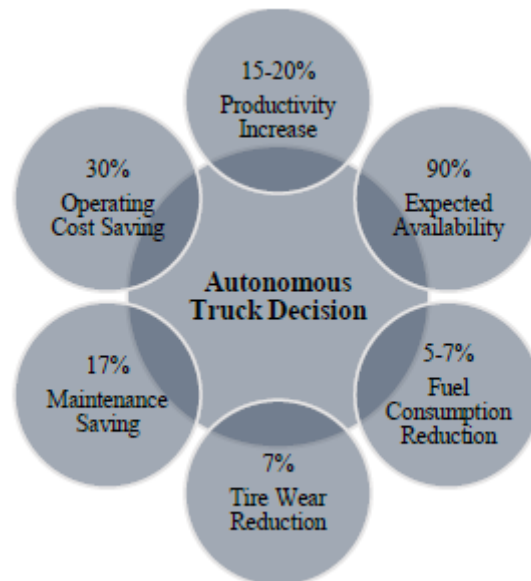
Seguindo o processo de incorporação de tecnologias de alto impacto produtivo, as empresas do setor de mineração de ferro, atividade relevante na composição do produto interno bruto de países como Austrália e Brasil, têm adotado a utilização de equipamentos autônomos de grande porte [1].

Diversos fabricantes têm trabalhado no desenvolvimento de tecnologias de equipamentos autônomos para a indústria de mineração [2] entre eles os grandes fornecedores de equipamentos como Caterpillar, Hitachi e Komatsu, sendo esta a pioneira. Em 2008 foram testados os primeiros caminhões fora-de-estrada autônomos na mina Gabriela Mistral, no Chile.

Equipamentos autônomos possuem a capacidade de operar sem intervenção humana direta e podem ser incorporados a sistemas de produção complexos como o de operação de mina a céu aberto, onde interagem com outros equipamentos, que podem ser tripulados ou não.

O conceito de transporte autônomo de materiais consiste, basicamente, em automatizar as principais funções do equipamento quando em modo produtivo. O caminhão autônomo, seguindo orientações do sistema de otimização de produção, é capaz de se dirigir até a praça de carregamento, aguardar em eventuais filas para carregar, se posicionar junto ao equipamento de carga - este tripulado - realizar carregamento, se deslocar até o ponto de destino respeitando todas as normas de tráfego, interagindo de forma adequada com os demais veículos durante o percurso e, por fim, bascular o material e reiniciar o ciclo de operação, repetindo ou não os pontos de origem e destino anteriores.

À medida que as empresas consolidam o uso da tecnologia autônoma e os usuários divulgam ganhos alcançados, mais empresas adotam a tecnologia e o número de equipamentos dotados de tecnologia autônoma vêm crescendo. A Figura 1 reúne os ganhos diretos mais evidentes. Entretanto é necessário estudo particular para determinar quantitativamente as alavancas de ganho.



**Figura 1.** Diversos ganhos associados a implantação da tecnologia de caminhões autônomos vêm sendo reportados. (GÖLBAŞI e DAGDELEN, 2017).

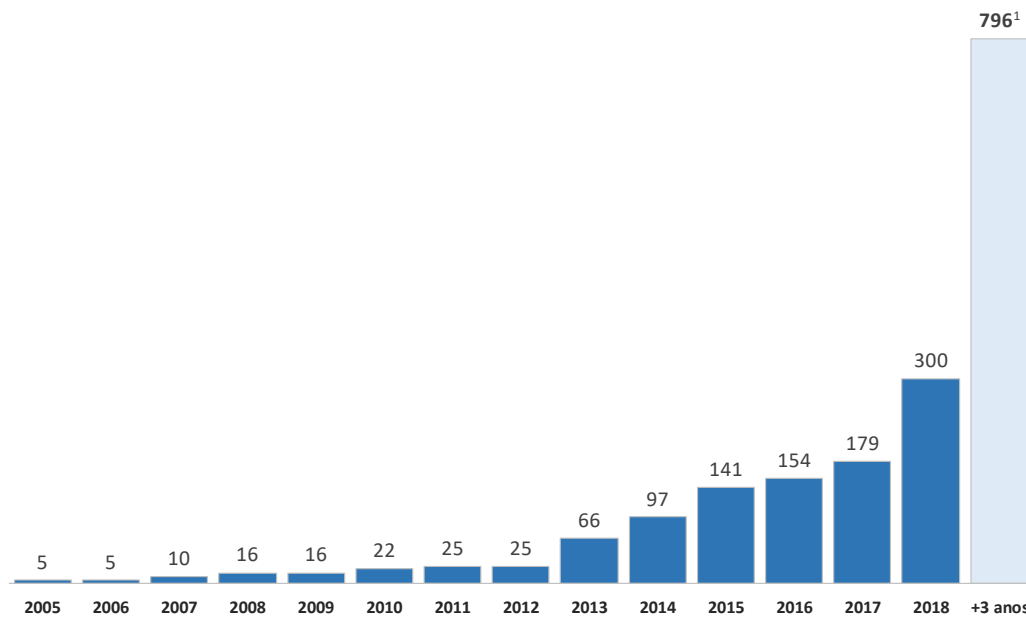
Segundo levantamento, utilizando-se de informações oficiais disponibilizadas pelos fornecedores, ao fim de 2018, esperava-se que 300 caminhões autônomos estivessem em operação no mundo. Para os 3 anos subsequentes, estima-se que a frota de caminhões autônomos em operação possua 796 unidades, como mostra a Figura 2.

Em 2016, a Vale iniciou o projeto de implantação de caminhões de grande porte autônomos na mina de Brucutu, em São Gonçalo do Rio Abaixo, MG.

A mina de Brucutu opera desde 2006, produzindo anualmente cerca de 30 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. Até o início da operação autônoma, utilizava caminhões 793C/D na frota de grande porte. A escolha pela implantação do projeto em Brucutu foi influenciada pelas já existentes qualidades construtivas e comportamentais da operação local, que são referência na Vale em relação a diversos aspectos de operação de mina, o que minimizaram as adequações necessárias para receber a tecnologia. Portanto, Brucutu foi a unidade que melhor atendeu às necessidades técnicas, geográficas, logísticas, dentre outras, para receber a primeira frota de transporte de grande porte completamente autônoma da Vale.

Em 2014, foi iniciado o projeto piloto, dividido em quatro etapas: implantação da perfuração autônoma, operação com cabine remota para trator de esteira, caminhões de carregamento autônomo de explosivos e, por fim, caminhões autônomos. A implantação dos caminhões autônomos na Mina Brucutu aconteceu de maneira gradativa em 2018, alcançando sua plenitude em 2019.

## Número de Caminhões Autônomos



**Figura 2.** Histórico da frota mundial de caminhões autônomos e seu crescimento expressivo a partir de 2018.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Tecnologia

Para que o caminhão autônomo desempenhe os ciclos de transporte de forma automática, o ambiente da mina é previamente virtualizado; as pistas e áreas de manobra são mapeadas por veículos leves e as áreas onde os caminhões irão trafegar são classificadas como áreas de carga, tráfego ou basculamento. Nas áreas de carga e basculamento podem existir áreas de movimentação dinâmica - o caminhão define livremente como ele se movimentará naquela região. Nas áreas de pistas são estabelecidos limites rigorosamente obedecidos. Os operadores do sistema, lidam, então, com uma mina virtualizada, mostrada na Figura 3.



**Figura 3.** Virtualização da mina; acessos e praças de carga e basculamento são mapeados no ambiente físico e representados no sistema de operação autônomo.

Os caminhões são equipados com sensores e atuadores que permitem que o equipamento perceba o ambiente e reaja a interferências durante o percurso, bem

como sistema de comunicação que os inserem em um contexto de interação e colaboração sistêmica de produção. A operação assistida dos caminhões autônomos funciona conforme diagrama da Figura 4, que define os pilares para funcionamento do sistema: comunicação via rádio e conjuntos de percepção, controle e georreferenciamento.



Figura 4. Diagrama do Sistema de Transporte Autônomo

O **sistema de percepção** capta informações em tempo real de objetos com comportamentos dinâmicos ou estáticos, assimilam as condições da superfície do local de rodagem, como elevações ou desníveis e identificam eventuais alterações no cenário que requeiram ou não ação em resposta. O sistema de percepção fornece, portanto, dados para o sistema de controle autônomo assumir decisões seguras durante o deslocamento, garantindo a integridade do equipamento e evitando a colisão com obstáculos, queda de bancadas ou risco de tombamento em piso irregular. No Sistema de Transporte Autônomo - AHS (em inglês, Autonomous Haulage System) são utilizados os sensores do tipo radar e LiDAR, além de sensores inerciais:

- LiDAR: em inglês Light Detection and Ranging, é um instrumento que mede distâncias a partir do conhecimento da velocidade da luz no meio e o tempo entre a emissão e recepção de um feixe de laser que reflete no anteparo e atinge os receptores.
- Radar: é um instrumento que emite ondas de rádio e empregando o efeito Doppler determina a presença, velocidade e posição de objetos numa distância de até 15 metros.
- IMU: em inglês Inertial Measurement Unit, é um conjunto de sensores como giroscópios, acelerômetros e magnetômetros que, de forma combinada, fornecem ao equipamento, por meio do sistema de gerenciamento de tração e estabilidade, a capacidade de reação em situações de falta de aderência dos

pneus na pista, além de orientar o equipamento no percurso em uma eventual perda da comunicação sem fio ou de georreferenciamento.

Cabe ressaltar que o LiDAR e radar, presentes no sistema de percepção dos equipamentos, se destinam a atuar apenas em casos emergenciais e não tem função de orientar o equipamento quanto às rotas a percorrer. Em condição de operação normal o sistema GNSS de alta precisão é que “guia” o equipamento durante a locomoção.

O **sistema de controle** do equipamento reúne todas as interações em malha fechada existentes no equipamento. Previamente calibrados, os sistemas de direção, freios e motriz recebem valores de referência calculados pelo algoritmo do sistema. Os atuadores, realimentados por cerca de 2000 pontos de leitura de medição embarcados, garantem o comportamento esperado de operação.

O **sistema de georreferenciamento** se baseia no uso de 2 receptores GNSS, e consiste de um conjunto de satélites artificiais regularmente posicionados na órbita terrestre, navegando em altitudes entre 1.000 e 36.000 km, transmitindo continuamente um ou mais sinais contendo informação da hora exata, bem como seus parâmetros orbitais. Havendo a perda ou degradação do sinal GNSS, o caminhão, principalmente deslocando em modo autônomo, por questões de segurança, interrompe a operação.

O **sistema de rádio** dos caminhões permite que os equipamentos tenham acesso à rede de comunicação do Centro de Comando e receba informações sobre as demais entidades do sistema, do ambiente onde ele trafega (limites das pistas virtuais) e designações de produção do algoritmo de otimização do sistema produtivo (despacho). Ele envia ao sistema constantemente dados dos demais sistemas citados; sua localização - provida pelo sistema de georreferenciamento - e dados de telemetria. O volume de dados deve trafegar entre os equipamentos e a sala de controle com altos requisitos de performance na comunicação de dados.

## 2.2 Pessoas

A implantação do sistema de transporte autônomo apresenta vantagens nos quesitos de produtividade e competitividade devido à padronização, eficiência e controle mais acurado da operação. Além disso, destaca-se dentre os benefícios a evolução dos fatores de segurança, uma vez que se retira o operador da exposição ao risco e ao ambiente severo da mina, além de proporcionar melhoria na condição e ergonomia de trabalho das equipes operacionais.

Os benefícios que motivam a adesão à tecnologia autônoma apenas são plenamente alcançados caso sejam incorporadas mudanças em diversos setores da cadeia operacional de mina. Com a adoção do sistema de transporte autônomo procedimentos, outrora flexibilizados na operação convencional, precisam ser seguidos estritamente, pois, como qualquer sistema de automação completa, o sistema de caminhões autônomos é sensível à falta de padronização e adequação às regras de operação e manutenção. Um exemplo são as dimensões e condições dos acessos, que precisam seguir os parâmetros construtivos indicados no manual do fabricante do equipamento (caminhão) para alcançar benefício máximo de aumento de velocidade média. Do contrário, haverá impacto em produtividade e, em casos extremos, toda a operação pode ser comprometida devido à inadequada manutenção nos acessos, por exemplo.

Durante a implantação da tecnologia autônoma os profissionais que irão operar o sistema, via de regra oriundos da área de operação de mina, necessitam de

treinamentos e capacitação. Novos requisitos operacionais surgem, visto que o processo produtivo agora é mais consistente e mais intolerante a desvios de operação e manutenção dos equipamentos. Destaca-se também a necessidade da equipe em lidar com sistemas informatizados – fator determinante na seleção e desenvolvimento da equipe.

Além disso, a introdução da automação afeta a força de trabalho em seu tamanho e forma: posições de trabalho são alteradas, e, com mais operações remotas, os antigos operadores de caminhão são realocados para novas funções, equipes de manutenção são alocadas previamente e de forma sistemática para garantir o funcionamento do processo. Novas habilidades são exigidas neste novo contexto organizacional e algumas habilidades se tornam obsoletas e precisarão ser readequadas.

Todas essas mudanças exigem um gerenciamento de pessoas cuidadoso para manter o engajamento do pessoal com a produção apesar do distanciamento físico. Baseando no modelo de mudanças desenvolvido por John Kotter [3], a fim de garantir um processo de gestão das mudanças eficiente, são sugeridos alguns pontos a serem seguidos, descritos a seguir.

Inicialmente é necessário motivar os participantes para apoiar a mudança, de forma a focá-los nos aspectos positivos associados à automação para superar a associação negativa de perda de emprego, utilizando para isso uma equipe de influenciadores, de posições formais de autoridade ou não. O uso destas lideranças formadores de opinião é importante, pois eles são capazes de reduzir a resistência à mudança, entendendo o panorama das partes interessadas, abordando as preocupações dos operários e fornecendo feedback aos gestores.

É importante criar uma visão para a mudança, desejável para todas as partes interessadas, mostrando os benefícios e oportunidades geradas, sendo transparente e reconhecendo possíveis impactos negativos. Esta comunicação da visão deve ser clara, consistente, regular e envolver o maior número possível de interessados. No contexto social faz-se necessário e desejável o envolvimento dos sindicatos e das áreas de relação com a comunidade da empresa.

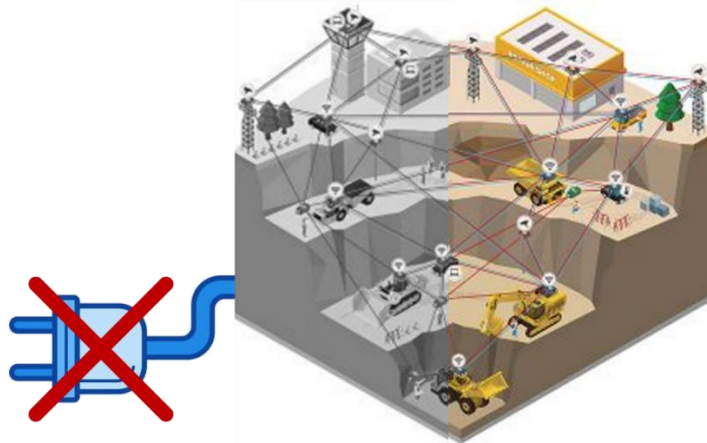
Durante a gestão de mudanças deve-se estabelecer metas e ganhos de curto prazo pois essa prática mantém os funcionários motivados - dividir o processo em etapas menores e celebrar pequenos sucessos apresenta maior eficiência neste momento. Por ser um ambiente dinâmico, a aceitação das mudanças só é garantida quando as novas práticas se tornarem o processo padrão. Até este nível de amadurecimento, o gerenciamento deve ser planejado e executado com grande disciplina, pois falhas de mudança podem não apenas resultar na falha do projeto, mas também podem afetar a disposição de longo prazo da empresa para mudanças futuras. Portanto, é crucial gerenciar adequadamente as mudanças para garantir a adaptabilidade a longo prazo da organização.

## 2.3 Processo

Uma vez definida a opção pelo sistema de transporte autônomo e estruturado o plano de desenvolvimento das equipes de operação e manutenção, resta concentrar esforços em mapear e formalizar, por meio de procedimentos, a nova dinâmica de operação de mina – o impacto na rotina é sensível e as áreas afetadas são mais numerosas do que podemos imaginar no primeiro momento.

É possível destacar alguns pontos que são críticos e que requerem atenção especial neste processo de remodelagem da rotina operacional. Os requisitos de

rede de comunicação de dados, já abordados nesse artigo, são um dos aspectos que necessitam maior esforço de integração. Isto se deve ao fato de que redes de alta abrangência (próxima a 100% de cobertura) e com altos requisitos de qualidade nunca foram componentes essenciais ao funcionamento das operações em minas convencionais. Os sistemas de despacho utilizados nesses ambientes são tolerantes a áreas de sombra e demandam baixo *throughput*. Portanto, apenas a súbita necessidade de uma rede sem fio de alta confiabilidade neste ambiente torna o tema desafiador e inédito sob muitos aspectos. Um dos complicadores existentes reside no fato de que as soluções de comunicação móveis contemporâneas foram desenvolvidas para atender às demandas de diferentes aplicações que não o uso em equipamentos de grande porte não tripulados em ambiente de mineração. Desta forma a equipe de planejamento de mina deve compartilhar com a equipe de telecomunicações, de forma antecipada, quais são as frentes inclusas no planejamento de curto prazo para que, ao iniciar as operações naquela nova área, a rede atenda com qualidade os equipamentos naquela região. É razoável a comparação entre a criticidade do fornecimento de energia elétrica em uma usina de beneficiamento e o fornecimento de rede sem fio em uma mina com equipamentos autônomos.



**Figura 5.** O fornecimento de rede sem fio, em uma mina com equipamentos autônomos, é tão crítico quanto prover energia elétrica para uma usina de beneficiamento.

Outro exemplo de integração que deve ocorrer trata da equipe de infraestrutura e o time de operação do sistema autônomo. As tecnologias atuais de caminhões autônomos não possuem a funcionalidade que permite os caminhões desviarem de obstáculos, mesmo que estáticos, que por ventura, bloqueiem a pista. Um acesso que apresente “matacos”, grandes buracos ou “borrachudos” interrompem o ciclo do equipamento e impõe perdas de produtividade. Nesse contexto a equipe de infraestrutura desempenha papel relevante na minimização deste fator e deve estabelecer um fluxo de informação contínuo com o time de operação do sistema autônomo. Já no âmbito da manutenção, mesmo as equipes responsáveis pela manutenção do equipamento base devem receber treinamentos sobre o hardware embarcado, uma vez que há intercessões entre partes eletrônicas, elétricas e mecânicas, além dos ativos de rádio e rede também instalados em toda a frota – autônoma ou não – da mina.

Os ganhos provindos da tecnologia serão maximizados com a completa integração e engajamento do time de operação de mina a empresa poderá colher os benefícios de uma operação mais segura, produtiva e consistente – como mostra a



comparação entre contrapilhamentos realizado pela frota autônoma e convencional, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.6**.



**Figura 6.** Comparação entre contrapilhamento realizado por frota autônoma, acima, e convencional, abaixo.

Entretanto, o ambiente automatizado exige maior integração entre as áreas, agora dependentes de novos “insumos”, como energia elétrica, rede sem fio de qualidade e novos procedimentos que vão ditar a nova cultura operacional da mina.

### 3 CONCLUSÃO

A implantação da tecnologia de caminhões autônomos traz benefícios diretos e indiretos inquestionáveis. Redução de frota devido à maior produtividade dos equipamentos autônomos, bem como maior consistência na operação dos equipamentos são os principais fatores que viabilizam a implantação da tecnologia em um contexto competitivo e agressivo da mineração.

Entretanto, o processo de implantação de tecnologias disruptivas, via de regra, demanda profunda mudança da cultura operacional. É preciso dispender esforços em todos aspectos do processo, divididos neste trabalho em três principais “pilares” do processo de gerenciamento de mudanças – tecnologia, pessoas e processos. Lidar com as pessoas e os processos durante a implantação é etapa crucial para obtenção do sucesso do projeto e constitui tema igualmente desafiador que as inerentes dificuldades tecnológicas envolvidas - estas, usualmente, são facilmente percebidas e naturalmente recebem maior atenção do time de implantação.

Portanto, para garantir o sucesso do projeto, além da execução técnica da implantação da tecnologia, é necessário que todos os times da empresa sejam envolvidos na inevitável mudança de paradigma operacional, compreendam qual seu papel neste processo, alterem os procedimentos da empresa, adequando-os ao novo contexto e sejam exigentes quanto ao cumprimento das premissas necessárias para obtenção dos benefícios do sistema autônomo.

## REFERÊNCIAS

- 1 GÖLBAŞI, O., DAGDELEN, K. "Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines", Proceedings of the International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, 2017.
- 2 HYDER, Z., SIAU, K., NAH, F. F.-H. \Use of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Autonomous Technologies in the Mining Industry". In: Thirteenth Midwest Association for Information Systems Conference (MW AIS 2017), 2018.
- 3 Kotter, JP. Leading change. Cambridge: Harvard University Press. 1996.