

CAMINHÕES AUTÔNOMOS E SEUS IMPACTOS NA PRODUÇÃO EM INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

AUTONOMOUS TRUCKS AND THEIR IMPACT ON PRODUCTION ON MINING INDUSTRY

Arthur Machado; João Victor Aragão; Lucas Dias¹
Célio Gentil²

RESUMO

Este artigo apresenta os impactos da produção de minas de cobre e ferro, com caminhões autônomos, com finalidade de auxiliar mineradoras no processo de automação da produção. O objetivo principal é mostrar como o caminhão autônomo pode ser importante para redução de custos e aumento na produtividade de uma mineradora. Para a elaboração do artigo, foi realizada uma pesquisa exploratória bibliográfica qualitativa onde foram analisados dados e situações de operações realizadas por caminhões autônomos, além de uma pesquisa de campo em uma empresa de mineração do interior de Minas Gerais. Os resultados obtidos foram que apesar de uma necessidade de um alto investimento inicial, e uma radical mudança na estrutura da empresa, os caminhões autônomos podem ser uma solução para melhoria na produção e redução de custos. Conclui-se que empresas que investirem na aquisição e implantação da produção por caminhões autônomos, terão uma vantagem competitiva em relação a outras empresas em um futuro próximo.

Palavra- chave: caminhões. automação. produção. mineração.

ABSTRACT

This article presents the impacts of the production of copper and iron mines, with autonomous trucks, in order to help mining companies in the production automation process. The main objective is to show how the autonomous truck can be important to reduce costs and increase the productivity of a mining company. For the elaboration of the article, qualitative bibliographic exploratory research was carried out where data and situations of operations carried out by autonomous trucks were analyzed, as well as field research in a mining company in the interior of Minas Gerais. The results obtained were that despite a need for a high initial investment, and a radical change in the company's structure, autonomous trucks can be a solution for improving production and reducing costs. It is concluded that companies that invest in the acquisition and implementation of production by autonomous trucks will have a competitive advantage in relation to other companies in the near future.

Keyword: trucks. automation. production. mining.

¹ Graduando do Curso de Engenharia de Produção da Faculdade Doctum, Juiz de Fora, Minas Gerais.

² Orientador: Graduado em Administração de Empresas e Direito; Pós-graduado em Gestão de Projetos/Produção, Gestão de Pessoas e Gestão Pública. Cursando Pós-graduação em Direito do Trabalho e Processual do Trabalho. Profissional: ocupou cargo executivo em empresa multinacional de grande porte.

1 INTRODUÇÃO

A indústria mineral está em grande desenvolvimento para uma maior automação de sua produção, fazendo com que a busca por produtos autônomos para produção dessa indústria aumente.

Na mineração a céu aberto, o principal modal de transporte de materiais na produção são os caminhões, assim, grandes fabricantes de caminhões para mineração têm trabalhado no desenvolvimento de caminhões autônomos.

Desde o final da década de 90, com a expansão da globalização e o aumento do consumo de metais, a indústria mineral tem crescido a ritmo acelerado, tanto em volumes extraídos, quanto em abertura de novas minas. (ARAÚJO E FERNANDES, 2016).

Visto a necessidade de empresas em acompanhar as novas tecnologias do mercado, o setor mineral foi obrigado a acelerar sua produção, pelo fato de que grande parte dos circuitos e *hardware*³, possuem metais como sua principal matéria prima.

Segundo Giese (2022, p.1), com a crise da covid 2019, a cadeia de suprimentos global foi interrompida diversas vezes, o que revelou uma dependência da economia mundial, causado pela escassez da oferta relacionada a metais.

Com a desvalorização da moeda brasileira em relação ao dólar, e o aumento da inflação mundial, o preço das peças e dos equipamentos usados na produção de mina aumentou, fazendo com que a indústria mineral seja obrigada a utilizar de políticas de redução de gastos, ao mesmo tempo que é necessário o aumento de produção. Conforme citam os autores:

Devido ao grande número de tarefas repetitivas e perigosas a mineração possui um grande escopo para aplicações robóticas, já que operações de mina requerem o manuseio de enormes quantidades de material de forma economicamente viável e segura. Assim, devido aos altos custos operacionais, a necessidade de grande produtividade impulsiona ainda mais o uso de robôs. Assim a indústria mineral se aproxima a de uma nova era, na qual robôs e automação irão ditar o futuro em termos de produtividade (SICILIANO E KHATIB, 2008, p.49).

Diante da necessidade de aumento na produção, e com a alta da inflação causada pela crise da covid 2019, o caminhão autônomo vem de fato para diminuir os custos operacionais na indústria de mineração? Segundo Subtil et al. (2011, p.1), o carregamento e transporte são as atividades mais críticas dentro do processo de lavra, já que representam quase 50% do custo operacional dentro de uma mina.

³ Componentes físicos do computador (circuitos eletrônicos, UCP, memória, teclado, monitor de vídeo). Compõem o potencial de recursos a serem utilizados. A parte física do computador. (CARNEIRO, 2006, p.3).

Com a diminuição das margens na produção mineral provocado pela crise do covid-19, a solução proposta para amenizar esse impacto foi a implementação de caminhões autônomos em minas de céu aberto.

Este presente artigo tem por objetivo mostrar como o caminhão autônomo pode ser importante para redução de custos e aumento na produtividade de uma mineradora, onde será apresentado o impacto no custo pessoal, o impacto na atividade e o impacto na manutenção.

Foi realizado uma pesquisa exploratória bibliográfica qualitativa, conforme cita os autores:

[...] Estas pesquisas têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é, portanto, bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado. Na maioria dos casos, essas pesquisas envolvem: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que "estimulem a compreensão". (SELLTIZ et al., 1967, p. 63).

Onde foram analisados dados e situações de operações realizadas por caminhões autônomos. Os métodos de estudo utilizados na pesquisa incluem uma revisão bibliográfica de artigos científicos, monografias e informações de uma empresa de mineração no interior de minas gerais.

Foi notado um grande movimento das empresas de mineração para automatizar sua produção, assim o presente artigo foi criado para auxiliar essas empresas nesse processo, evitando com que as mesmas consigam direcionar seus investimentos da forma mais adequada.

2 IMPACTOS DE UMA PRODUÇÃO POR CAMINHÕES AUTONOMOS

Segundo Guieiro et al. (2019, p.2), o conceito de transporte autônomo consiste em automatizar as principais funções do equipamento quando em modo produtivo. O caminhão autônomo é capaz de dirigir até praças de carregamento, aguardar em filas, se posicionar junto ao equipamento de carga, realizar o carregamento, e se deslocar até o ponto de destino respeitando as regras de tráfego, pôr fim bascular o material no local desejado, sendo esse ciclo de operação, ser repetido ou não nos pontos de origem e destino.

Ainda segundo os autores, grandes fabricantes famosos no desenvolvimento de maquinários para mineração, como Caterpillar, Hitachi e Komatsu que atuam no seguimento de mineração pesada, tem investido no desenvolvimento de tecnologias

para caminhões autônomos, para uma produção com automação nível 5⁴. Sendo a Komatsu a primeira a testar seu produto em 2008 na mina de cobre Gabriela Mistral, na região de Antofagasta, no Chile.

2.1 PRODUÇÃO DE MINA

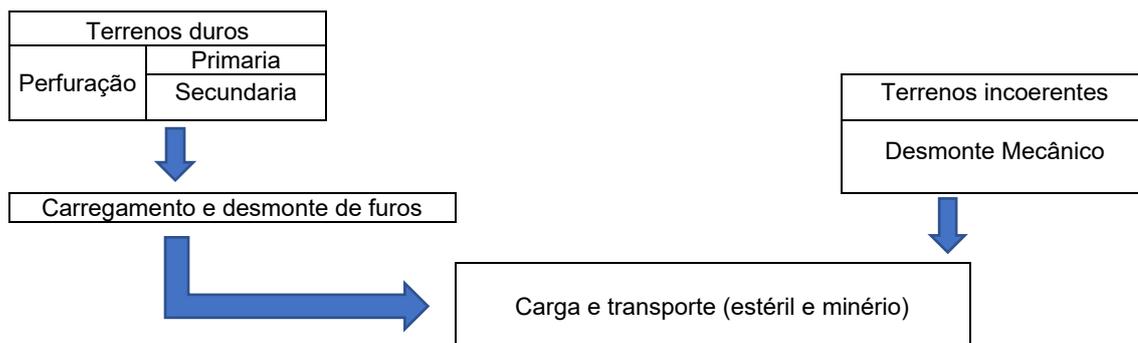
Segundo Couto (1990), é definido com mineração a céu aberto, as lavras onde o processo de escavação é desenvolvido ao ar livre e dirigidas a depósitos superficiais, ou seja, lavras que não são cercadas por terrenos encaixantes. A mineração a céu aberta, além de mais segura, leva vantagem na produtividade em relação a mineração em subsolo, apesar de, às vezes, penalizar no aspecto qualidade do produto (*ROM – Run-of-mine*)⁵ em função de perda de seletividade e efeito escala. Sendo que esse aumento de produtividade, teve origem, após a segunda guerra, com a introdução de novos explosivos, novas máquinas de perfuração, aumento da capacidade das máquinas de desmonte, melhoria dos processos de beneficiamento dos minerais e uso de equipamentos de escavação e de transporte de grandes capacidades.

De acordo com Quevedo (2009), as operações de carregamento de transporte consistem em retirar o material extraído da frente de lavra até diferentes pontos de descarga. Sendo na mineração a céu aberto a produção se inicia com a preparação da lavra, para que a mesma possa ser perfurada e desmontada, quando necessário. Logo após o desmonte, a escavação é feita por escavadeira, que estão estrategicamente distribuídas em praças para atender a demanda de produção. Estes equipamentos retiram o material e o carregam nos equipamentos de transporte, sendo eles caminhões, vagões, correias transportadoras, entre outros. Os equipamentos de transporte movem o material até pontos de descargas, como britadores, pilha estéril ou pilha pulmão, e o ciclo da operação recomeça, sendo realizada de forma contínua. A sequência ou ciclo normal das operações da lavra fundamentais a céu aberto pode ser sintetizada segundo o diagrama apresentado na Figura 1 - Ciclo normal de operações mineiras.

⁴ Acontece quando o sistema pode completar operações sustentadas de forma autônoma, com e sem área autônoma designada, e com capacidade de sensibilização da situação. (CMG GROUP, 2019, p.4).

⁵ Minério em seu estado natural, não processado. (GUBERT E GOMES, 2010, P.53).

Figura 1: Ciclo normal de operações mineiras.



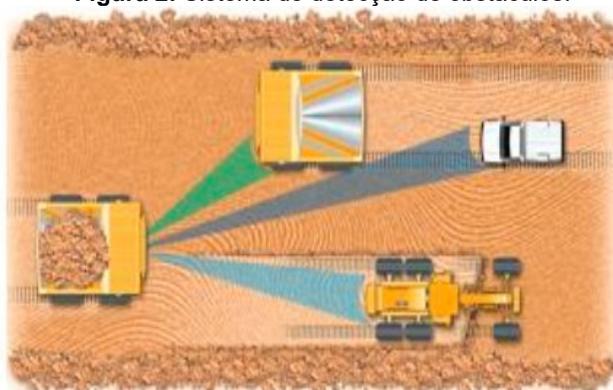
Fonte: Couto (1990).

2.2 CAMINHÕES AUTÔNOMOS

Para o funcionamento do sistema de transporte autônomo cada caminhão é equipado com um (*GPS - Global Positioning System*)⁶ de alta precisão, de maneira que cada caminhão operado na mina tenha sua posição conhecida e controlada pela sala de controle a todo momento. Se faz necessário também, manter uma rede de internet sem fio, que possibilita que o controle tenha informações em tempo real da produção. Os caminhões também contam com um sistema de detecção de obstáculos, que com auxílio de sensores, eles conseguem detectar a presença de outros caminhões, veículos de apoio, ou pessoas que estejam trabalhando na mina, sendo que quando identifica algum obstáculo o caminhão irá diminuir sua velocidade, ou até mesmo parar por completo (RIVERA, 2014, p.23).

Na Figura 2 – Sistema de detecção de obstáculos, é mostrado o funcionamento do sistema de detecção de obstáculos apresentado por Rivera (2014, p.23).

Figura 2: Sistema de detecção de obstáculos.

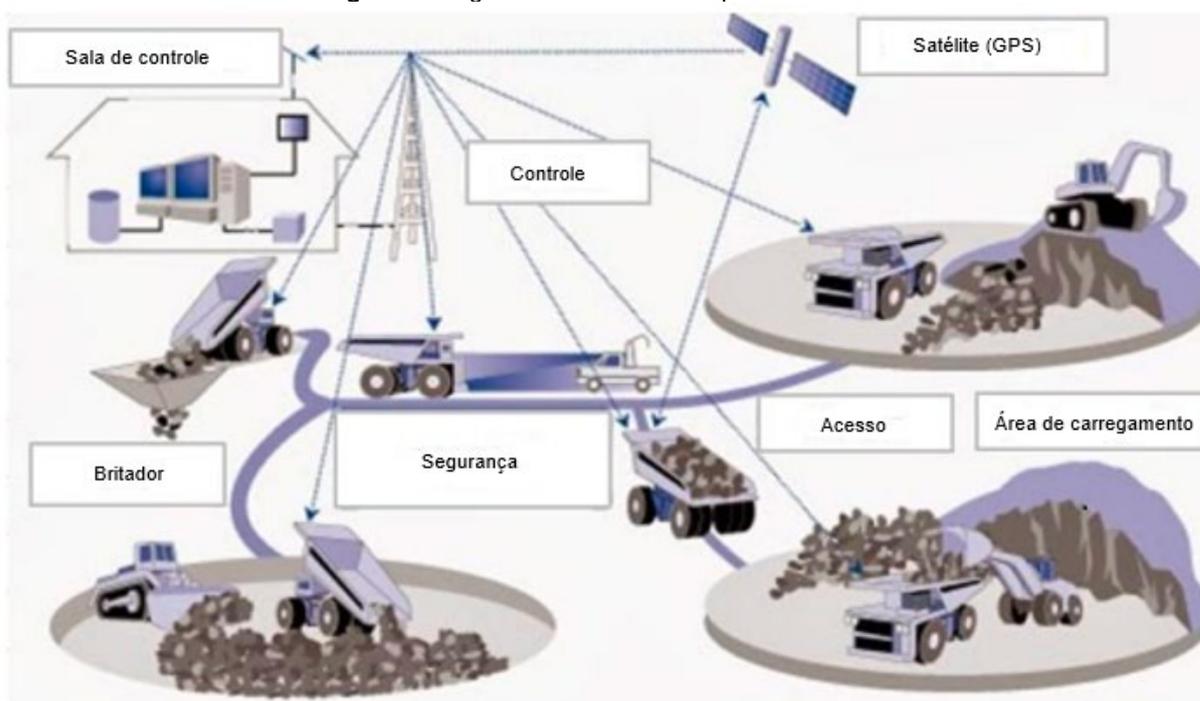


Fonte: Rivera (2014).

⁶ Sistema de posicionamento global. Uma constelação de vinte e quatro satélites, orbitando em torno da Terra a uma altura aproximada de 20.200 km acima do nível do mar, permitindo a receptores conhecer sua posição em qualquer lugar sobre a Terra com uma notável precisão. (ALVES, 2006, P.17).

O autor conclui que o sistema de detecção faz com que o descarregamento seja realizado de maneira mais segura. Um sistema de *GPS* informa sobre a posição dos caminhões e as rotas disponíveis, sendo que essas informações são trazidas a base de dados do satélite, fazendo com que na sala de controle, o operador da mina em conjunto com o algoritmo determine a melhor rota para cada caminhão, de acordo com o mapa da mina. Sendo esse ciclo representado pela Figura 03 – Diagrama sistema de transporte Autônomo.

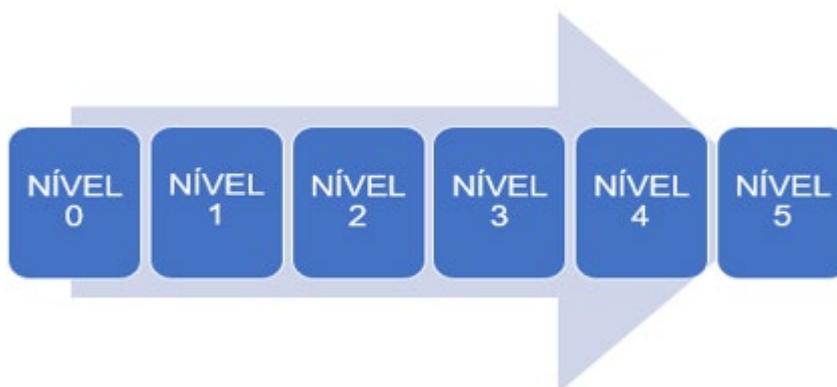
Figura 3: Diagrama sistema de transporte Autônomo.



Fonte: Autores (2022). Adaptado de Rivera (2014, p.24).

2.3 NÍVEIS DE AUTOMAÇÃO

Segundo *CMG GROUP - Global Mining Guideline Group* (2019, p.4) existem 5 níveis de automação para uma produção de mina. Esses níveis passam de uma operação totalmente manual, para uma operação híbrida, até uma operação 100% autônoma como mostrado na Figura 4 – níveis de automação:

Figura 4: níveis de automação

- NÍVEL 0: Nenhuma automação
- NÍVEL 1: Com assistências
- NÍVEL 2: Semiautônomo
- NÍVEL 3: Autônomo por condição
- NÍVEL 4: Alta automação
- NÍVEL 5: Automação completa

Fonte: Autores (2022). Adaptado de *CMG GROUP* (2019).

Neste presente artigo, todos os caminhões mencionados estão no nível 5 de operação autônoma, que segundo *CMG Group* (2019, p.4), o nível 5 é onde o sistema pode completar operações sustentadas de forma autônoma, com e sem área autônoma designada, e com capacidade de sensibilização da situação. No nível 5 o sistema poderá intervir em situações de risco mínimo, já para situações de maiores riscos, o sistema entrará em um estado interrompido.

2.4 IMPLANTAÇÃO

A introdução de sistemas autônomos é uma mudança holística sendo necessário verificar se tal mudança é necessária e valiosa, ao mesmo tempo em que se aborda custos e riscos envolvidos. (*GMG GRUOP*, 2019, p.8)

A implantação e implementação de sistemas autônomos, geram um enorme impacto na mão de obra das mineradoras, como cita o grupo:

A implantação desses sistemas afeta o tamanho e forma da força de trabalho, já a partir da implementação, o natural para a atividade de mineração e que se tenha menos opções para trabalho local e mais opções para trabalho remoto. Outro fator importante para se levar em consideração é a necessidade de novas habilidades, para um melhor funcionamento de novas estruturas organizacionais, fazendo-se necessário a criação de novas funções, e a extinção de funções já existentes. (*GMG GRUOP*, 2019, p.8).

Dentro da parte de processos, a automação na mineração afeta planos de gerenciamento de tráfego, planos de gerenciamento de segurança, procedimento para

trabalho seguro, instruções de trabalho, gestão de turnos, além de uma interligação entre áreas autônomas com a manutenção. Essas mudanças precisam ser realizadas prontamente, e o layout, projeto e planos da mina precisam ser adaptados para comportar os equipamentos autônomos. (GMG GRUOP, 2019, p.9).

O grupo também cita, os custos que a implementação de equipamentos gera para as mineradoras:

A implementação de equipamentos autônomos, obriga também o investimento em tecnologia de suporte, como uma sofisticada rede de internet sem fio e salas de controles, além de treinamentos e gastos com futuras atualizações da tecnologia. (GMG GRUOP, 2019, p.9).

A Foto 1– Monitoramento de caminhões autônomos na mina de Brucutu, Vale, Minas Gerais, mostra um funcionário da Vale na mina de Brucutu na sala de controle de uma operação por caminhões autônomos.

Foto 1: Monitoramento de caminhões autônomos na mina de Brucutu, Vale, Minas Gerais.



Fonte: Vale (2018).

2.5 CUSTOS PARA IMPLANTAÇÃO

De acordo com Parreira (2013, p.150), foram estimados os custos de implantação de uma frota do caminhão CAT793D, sendo eles caminhões fora de estrada com capacidade de carga de 250 toneladas, e comparou com os custos de uma frota autônoma. Cada caminhão convencional possui o custo estimado em 4 milhões de dólares, enquanto o custo do mesmo caminhão autônomo foi estimado em 5 milhões de dólares. Com isso, é estimado que o custo de compra de uma unidade de um caminhão autônomo é cerca de 20% mais caro que a compra de um caminhão convencional. Porém com as economias geradas pelo transporte autônomo, uma frota com 9 caminhões convencionais pode ser substituída por 7 caminhões autônomos. Assim o custo para a aquisição de 7 caminhões autônomos fica em 35 milhões de dólares, já o custo de aquisição de 9 caminhões convencionais fica em 36 milhões de

dólares, gerando uma economia de 1 milhão de dólar para aquisição da frota autônoma. Outros fatores a serem analisados segundo Brundrett (2014) são os custos com treinamento, infraestrutura de telecomunicação de posicionamento, mapeamento digital da mina, instalação e comissionamento. Sendo que Parreira (2013, p.150) estimou o custo de implantação para uma frota de 7 caminhões CAT793D em aproximadamente 7 milhões de dólares. Como demonstrado na Tabela 1 – Custo de implantação para uma frota de 7 caminhões CAT793D.

Tabela 1: Custo implantação para uma frota de 7 caminhões CAT793D.

ELEMENTOS	QUANTIDADE	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL
Estação Básica de transmissão	30	\$30.000,00	\$900.000,00
Servidores (com redundância)	8	\$12.500,00	\$100.000,00
Roteadores (24 portas/PoE)	10	\$40.000,00	\$400.000,00
Interruptores	20	\$5.000,00	\$100.000,00
Sistema de energia (com redundância)	1	\$150.000,00	\$150.000,00
Adaptação de rede (Cabos CAT 6)	1	\$200.000,00	\$200.000,00
Sistema de monitoramento (Câmera, especificação SW, etc.	1	\$1.500.000,00	\$1.500.000,00
Sistema de posicionamento com redundância (DGPS, antenas etc.)	1	\$200.000,00	\$200.000,00
TOTAL ELEMENTOS			\$3.550.000,00
SERVIÇOS	QUANTIDADE	CUSTO UNITÁRIO	CUSTO TOTAL
Instalação e comissionamento	1	\$700.000,00	\$700.000,00
Consultoria (12 meses)	4	\$180.000,00	\$720.000,00
Gerente de projeto (6 meses)	2	\$100.000,00	\$200.000,00
Link de transmissão	2	\$10.000,00	\$20.000,00
Treinamento	20	\$50.000,00	\$1.000.000,00
Transporte/Logística	1	\$500.000,00	\$500.000,00
TOTAL SERVIÇOS			\$3.140.000,00
TOTAL ELEMENTOS + SERVIÇOS			\$6.690.000,00

Fonte: Autor (2022). Adaptado de Parreira (2013).

Cita Parreira (2013, p.10), que é possível transformar a frota convencional existente em uma mina, para um sistema de operação autônoma, desde que a frota seja implementada com componentes como, um sistema de rede *wireless*⁷, sensores capazes de fornecer informações relacionadas a navegação e previsão de colisão, computador de bordo para processar informações de acelerador, freio e direção, dispositivos de controle para regular os elementos dos caminhões, um sistema de processamento central, um sistema de GPS com precisão menor que 10 cm para fornecer a localização em tempo real dos caminhões, e um sistema de *software*⁸ capaz de controlar e supervisionar os equipamentos.

⁷ Comunicação de dados sem a utilização de meios físicos como portadora para transferência do sinal. (LOURENÇO E BAREA, 2011, P.1).

⁸ Programas executáveis em computador de qualquer porte ou arquitetura. (PRESSMAN E MAXIM, 2021, P.2).

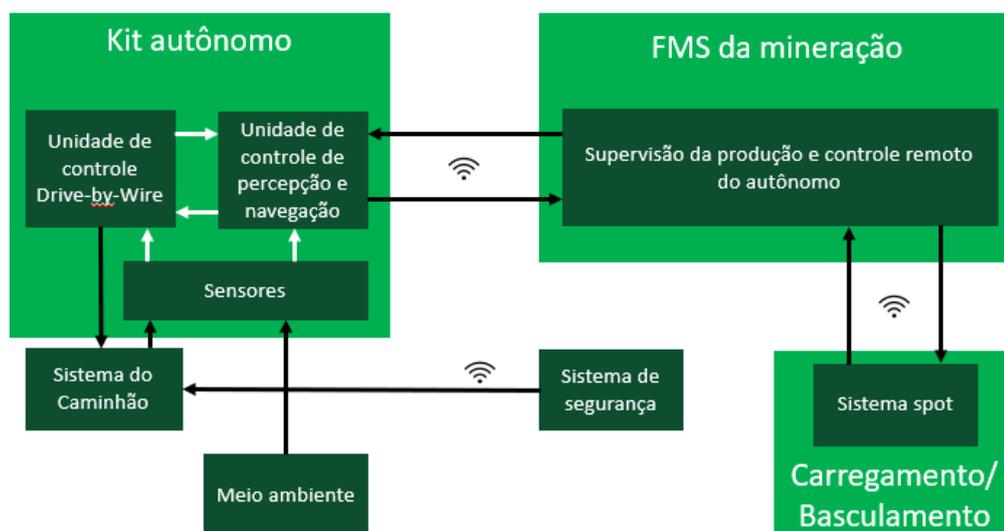
2.5.1 Modelo próprio

Com base na premissa que é possível transformar uma frota de caminhões convencionais em uma frota autônoma, uma empresa de mineração do interior do estado de Minas Gerais, optou pela criação de seu próprio modelo, por se tratar de uma empresa prestadora de serviços, foi criado um modelo de automação nível 5 que não precisa de muitas adequações para as minas.

O kit autônomo da empresa, permite transformar um modelo convencional a um custo de aproximadamente 120 mil dólares, ou seja, 12% da diferença entre o preço de aquisição de um modelo convencional para um modelo autônomo. Em termos de comparativo com o estudo de Parreira (2013), para uma frota de 7 caminhões autônomos, se utilizar o kit produzido por essa empresa, terá uma economia de cerca de 6,16 milhões de dólares. O tempo praticado para a implantação do kit para transformação do caminhão e de aproximadamente 2 semanas.

A plataforma utilizada pela empresa para utilização do kit autônomo é composta pelo sistema de controle de direção proporcional, o kit de aplicação (*plug and play*) e um comunicador com o centro de controle operacional (CCO). O funcionamento desse sistema é demonstrado na Figura 5 - Funcionamento caminhões por kit autônomo.

Figura 5: Funcionamento caminhões por kit autônomo.



Fonte: Autores (2022).

O sistema autônomo desse modelo é composto por alguns subsistemas, sendo primeiro o kit autônomo, que é o produto embarcado composto por um computador, e uma placa de controle, que faz a interface entre o que o computador está processando com os sensores de atuação interna, esses sensores permitem a identificação de problemas tanto mecânico, quanto de obstáculos que são necessários desvio durante

o percurso na produção, melhorando assim qualidade da informação e segurança da produção. Outro subsistema é o FMS⁹ da produção, que é responsável por monitorar e gerenciar a atuação do caminhão na mina, nele está a atuação humana no controle de mina, onde é controlado as áreas onde o caminhão irá atuar dentro da mina, como também o controle de manutenções. Há também um subsistema de redundância, que ajuda na segurança da operação, onde foi colocado um botão com acionamento por radiofrequência, que para o caminhão por completo caso haja uma falha catastrófica no sistema.

2.6 AUMENTO DE PRODUTIVIDADE

Um dos principais fatores para aumento da produtividade é a utilização do equipamento. Para Rivera (2014, p.49) um dos principais fatores para a uma melhor utilização dos equipamentos está em um melhor gerenciamento das horas de reserva, que incluem horas que o equipamento, apesar de estar em plena condição para uso, não está realizando suas funções específicas, como por exemplo, em tempos de filas de carregamento, troca de turno, horários de refeições, abastecimento, espera para desmonte, entre outros. O autor destaca que:

Um dos maiores benefícios esperados da automação, e que por não depender da operação humana, se evita a perda de tempo associada a necessidades humanas, como mudança de turno e horários para refeições. Além disso com uma melhor eficiência no consumo de combustíveis, é esperado uma redução no tempo perdido com abastecimentos. (RIVERA, 2014, p.49)

Cita Parreira (2013), em seu estudo os resultados sobre o tempo de troca de turno, demoras no processo, tempo gasto com refeições e horas de transporte em comparação do sistema autônomo com o sistema convencional. Como demonstrado na Tabela 2 - Horas de transporte, mudanças de turno, refeições e demoras no processo.

Tabela 2: Horas de transporte, mudanças de turno, refeições e demoras no processo.

Elemento		Convencional	Autônomo
Média de troca de turno	h/d/caminhão	0,4	0
Média de tempo com refeições	h/d/caminhão	1,9	0
Demoras no processo	h/d/caminhão	2,2	2,1
Média total de transporte	h/d/caminhão	15,6	17,6

Fonte: Autor (2022). Adaptado de Parreira (2013).

Se observa as maiores diferenças nos caminhões autônomos, por não precisar de operadores humanos, tem um gasto de 0 [h] para trocas de turnos e refeições, enquanto os convencionais têm um gasto de 0,4 [h] e 1,9 [h], respectivamente. Em

⁹ Sistema de Gerenciamento de Frotas. Ajuda a mina a otimizar seu ciclo de transporte e a reduzir drasticamente os tempos de inatividade do caminhão. MODULAR MINING (2022)

tempos gastos com demoras no processo as diferenças são muito pequenas, sendo (0,1) [h] maior para caminhões convencionais. No último parâmetro, foi mostrado que na média total de transporte há um ganho de 2 [h] mais de produção durante um dia para o transporte autônomo.

Na tabela 3 - Horas de operação e horas de reserva, é mostrado um comparativo entre as horas reservas e as horas em operação.

Tabela 3: Horas de operação e horas de reserva.

Parâmetro	Convencional	Autônomo
HO [h]	15,6	17,6
HR [h]	4,5	2,1

Fonte: Autores (2022). Adaptado Parreira (2013).

Pode-se observar que o caminhão autônomo tem 89,2% de utilização diária, enquanto o convencional tem 77,7%, com isso o impacto da tecnologia autônoma na utilização dos caminhões foi positivo em 11,5%.

Para Rivera (2014, p.51) produtividade de um caminhão é um produto da carga útil que transporta pela quantidade de ciclo que realiza durante o seu tempo de produção. Por um lado, a carga útil é independente do modelo, e não deve haver diferença de carregar o equipamento entre o modelo autônomo e o convencional, por outro lado, a quantidade de ciclos é variável, sendo o mesmo dependente da operação do equipamento e este é o melhor parâmetro para definir a produtividade. Sendo que os caminhões autônomos levam a vantagem na quantidade de ciclos, por terem uma maior precisão na direção. Como representado na Tabela 4 – número de ciclos e carga útil por Parreira (2013).

Tabela 4: Número de ciclos e carga útil.

Elemento		Convencional	Autônomo
Média de ciclos	[ciclos/d]	18,9	23,1
Média carga útil	[t/ciclo]	223,9	222,1

Fonte: Autores (2022). Adaptado Parreira (2013).

Foi observado que os caminhões autônomos realizam 23,1 ciclos de carregamento, transporte e descarregamento por dia, contra 18,9 ciclos dos caminhões convencionais. Uma diferença substancial já o caminhão autônomo realiza mais de 4 ciclos extra por dia. Por outro lado, como era esperado, a média de carga útil teve uma margem de apenas de 1,8t, distância que deve diminuir de acordo com a simulação, já que tende a ser igual.

Cita Parreira (2013), que o caminhão autônomo produz 22,2% a mais que caminhões convencionais, como demonstrado na Tabela 5 – Produtividade.

Tabela 5: Produtividade.

Parâmetro	Convencional	Autônomo
Produtividade [t/d]	4.231	5.130

Fonte: Autores (2022). Adaptado Parreira (2013).

2.7 REDUÇÃO DE CUSTO COM MANUTENÇÃO

Tirando como amostragem os custos de manutenção praticados pela empresa de mineração citada nesse presente artigo, o custo de pneus representa cerca de 30% do custo total de peças de uma frota de caminhões. Segundo Parreira (2013) possuem um custo de pneus mais baixo devido à redução de desgaste dos mesmos. Cada caminhão CAT793D tem seis pneus a custo aproximado de 33.000 dólares, ou cerca de 200.000 dólares por caminhão. Sendo em média, os caminhões de transporte manual, têm uma taxa de desgaste de pneus de 0,015 mm/ciclo, enquanto caminhões de transporte autônomo têm uma taxa de desgaste de 0,014mm/ciclo, ou seja, uma operação por caminhões autônomos tem em média 7% de economia em relação a operação por caminhões convencionais. Veja o que destaca o autor:

Caminhões autônomos se movem em velocidades mais constantes, evitando acelerações e desacelerações que são característica de uma operação humana. Assim esse tipo de caminhão funciona nas condições as quais foi desenvolvido, e seu funcionamento não depende da experiência, habilidades ou humor do seu operador. Sendo que essa consistência na operação, causa uma diminuição nos níveis de desgaste e falha do equipamento, fazendo que o tempo médio entre as falhas diminuam. (RIVERA, 2014, P.47).

Ainda segundo ao autor, em contrapartida a diminuição de falhas mecânicas, caminhões autônomos, são mais sofisticados, pois possuem uma série de sistemas que possibilitam seu funcionamento, por isso existe um aumento de possíveis falhas, já que onde há mais sistemas, há mais falhas. Além disso o fato de as tecnologias serem mais recentes e os mecânicos terem menos experiência, isso pode aumentar o tempo para executar a manutenção. Portanto, apesar da autonomia dos caminhões reduzir o número de falhas mecânicas, não é garantido que o equipamento passe menos tempo na oficina.

Na Tabela 6 – Horas em manutenção mostra as horas medias de manutenções programadas e não programadas, de acordo com um estudo de Parreira (2013).

Tabela 6: Horas em manutenção.

Elemento		Convencional	Autônomo
Média de manutenções preventiva	h/d/caminhão	2,6	2,8
Média de manutenções corretiva	h/d/caminhão	1,3	1,4

Fonte: Autores (2022). Adaptado de Parreira (2013).

Assim pode-se observar que existe uma pequena diferença em horas de manutenção entre os dois modelos. Os caminhões autônomos passam 0,2 [h] a mais

que os convencionais em manutenções preventiva e 0,1 [h] a mais em manutenções corretivas.

Na Tabela 7 – Disponibilidade mecânica, a autora calcula a disponibilidade mecânica de cada sistema sendo ela 83,7% para caminhões convencionais e 82,4% para caminhões autônomos. Assim, pode-se dizer que o impacto da tecnologia autônoma na manutenção foi negativo em 1,3%.

Tabela 7: Disponibilidade mecânica.

Parâmetro	Convencional	Autônomo
Disponibilidade mecânica [%]	83,70%	82,40%

Fonte: Autores (2022). Adaptado de Parreira (2013).

2.8 REDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para Brundrett (2014, p.37) existem algumas razões principais para que caminhões de mineração autônomos consumam menos combustível que os convencionais, entre elas os caminhões autônomos são mais consistentes na direção, fazendo com que tenha menos ou nenhum balanço lado a lado, o que reduz sua distância de transporte. Eles também mudam de marcha, aceleram e freiam com muito mais eficiência que os caminhões operados por humanos, assim como também eles não têm a necessidade de se deslocarem para áreas de mudança de turno. Assim foi determinado que uma frota com caminhões autônomos tem em média um consumo de 5% a 7% menor que uma frota com caminhões convencionais, tirando como base uma frota com 7 caminhões autônomos. Com base nos consumos relatados, Parreira (2013) estima que essa mesma frota com 7 caminhões autônomos, geram uma economia por volta de 1 milhão de dólares ano, ao repor 9 caminhões autônomos em uma mina que produz por volta de 38.000 toneladas dia. Os custos foram demonstrados na Tabela 8 – Economia de consumo de combustível.

Tabela 8: Economia de consumo de combustível.

	Caminhões convencionais	Caminhões autônomos	Unidade
Produção de mina	37.876		Toneladas por dia
Consumo de combustível	0.83	0.76	Litros de combustível por toneladas
	31.430	28.779	Litros de combustível por dia
	11.471.808	10.504.306	Litros de combustível por ano
Preço do combustível	\$ 1,00		Dólares por ano
	\$ 11.471.808,00	\$ 10.504.306,00	
Economia de Combustível anual	\$ 967.502,00		

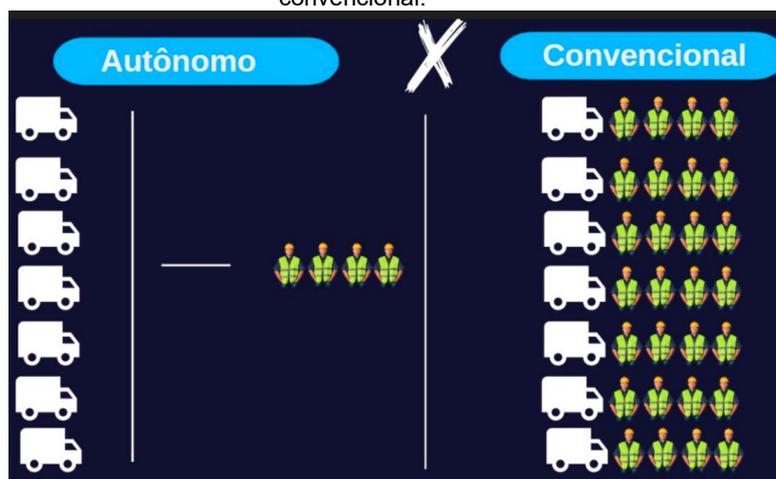
Fonte: Autores (2022). Adaptado Parreira (2013).

2.9 REDUÇÃO DE CUSTOS COM MÃO DE OBRA

A economia na mão de obra do operador de caminhão, pode variar muito de uma operação para outra, dependendo dos salários dos motoristas e taxas de mineração. Sendo os salários dos motoristas variam significativamente de alguns países para outros, especialmente entre países desenvolvidos e subdesenvolvidos. Para países desenvolvidos como a Austrália, salários chegam a 250.000 dólares ano, mas são mais frequentes de 130.000 a 150.000 dólares ano, semelhante ao que acontece no Canadá. Em operações em minas gigantes no Chile, os salários anuais de operadores estão entre 60.000 a 70.000 dólares ano, enquanto em países vizinhos, como no Peru, que as minas estão em fase de desenvolvimento, os salários giram em torno de 30.000 dólares ano. Por fim em economias pouco desenvolvidas como nações africanas, os salários são ainda menores que os praticados no Peru. (BRUNDRETT, 2014, p.40).

Ainda segundo o autor, para cada caminhão operando, em 2 turnos, durante 24 horas por dia, são necessários 4 operadores já que cada operador trabalha em turno de 12 horas, sendo no mês, duas semanas de folga e duas trabalhando. Adicionando o custo de férias e absenteísmo o custo de mão de obra é elevado a 4,2 operadores. Já para sistemas autônomos, é necessário esse mesmo custo de 4,2 operadores para monitorar 7 caminhões na mina. Sendo em uma operação com salário médio dos operadores de 100.000 dólares ano, a troca de 45 caminhões convencionais em caminhões autônomos, geraria uma economia anual de 80 milhões de dólares ano. Para a ilustração da economia com o custo de mão de obra foi criada a Figura 6 - Comparação entre o número de operadores necessário para uma produção com a frota autônoma e convencional.

Figura 6: Comparação entre o número de operadores necessário para uma produção com a frota autônoma e convencional.



Fonte: Autores. Adaptado de Brundrett (2014)

3 METODOLOGIA

Para a elaboração do presente artigo, foi realizada uma pesquisa exploratória bibliográfica qualitativa, onde foi retirado dos artigos de Parreira (2013) e Brundrett (2014), informações sobre a produção de minas onde o caminhão autônomo foi aplicado. Para complemento e comparações foi retirado informações de uma empresa do interior do estado de Minas Gerais, a qual trabalha um dos autores desse artigo, através de entrevistas com engenheiros da empresa e visitação ao setor de inovação, onde está sendo desenvolvido o modelo próprio citado no artigo. Sendo que todas as informações referentes a empresa contidas no presente artigo, foram analisadas e aprovadas pela gestão administrativa da empresa, para serem publicadas no mesmo.

4 RESULTADOS

A implantação de um sistema de transporte autônomo através de caminhões, implica em uma série de mudanças na estrutura da empresa, desde a mão de obra de fabrica até na gestão. Assim para realizar uma transformação da frota para caminhões autônomos, a empresa deve ter em mente, que será necessário gastar uma boa quantia inicial, já que a mesma terá que mexer drasticamente com sua mão de obra, terá de mexer na estrutura de suas operações, e gastar com aquisições de novas maquinas e implementação da nova tecnologia.

Para empresas que desejam economizar na aquisição e instalação de novos equipamentos, foi mostrado que é possível desenvolver sua própria tecnologia para transformação da frota através de um kit de automação, porém pode ser um processo mais demorado do que a aquisição. Outra alternativa é negociar com empresas que já tenham desenvolvido um kit autônomo para aplicação na frota.

Após implantados, caminhões autônomos possuem uma grande vantagem em relação ao aumento da produtividade, já que por não terem operadores, eles ganham no tempo de realização de necessidade fisiológicas, e na precisão da direção.

Os caminhões autônomos também possuem uma grande vantagem na redução de custo, já que apesar de não apresentarem uma vantagem no tempo de manutenção preventiva e corretiva, apresentam uma ampla vantagem na redução de custos com pneus e combustíveis, que são parte significativa no custo total de produção.

Outra grande vantagem mostrada está a redução de custo com mão de obra já que para uma amostragem de 7 caminhões autônomos, foi concluído que necessita a mesma quantidade de operadores de um caminhão convencional.

Os ganhos e perdas na produção por caminhões autônomos são apresentados na Tabela 9 – Ganhos e perdas em uma operação com caminhões autônomos.

Tabela 9: Ganhos e perdas em uma operação com caminhões autônomos.

Caminhões autônomos	
Utilização	11,50%
Produtividade	22,20%
Economia de pneus	7%
Disponibilidade mecânica	-1,30%
Combustível	8,10%
Mão de obra	85,70%

Fonte: Autores (2022).

Foi concluído que apesar da implantação de uma linha de produção autônoma ser uma mudança drástica, tanto em termos financeiros, quanto na estrutura organizacional, caminhões autônomos tem uma excelente vantagem competitiva em relação aos convencionais, assim os mesmos tendem a se pagar ao decorrer dos anos. Por isso empresas que optam por realizar essa transformação de frota, terão uma vantagem competitiva em relação as outras em um futuro próximo.

O presente artigo não explorou todo o potencial de viabilidade do tema, mas servirá para pesquisa de outros trabalhos e contribuirá para o processo de melhoria continua.

5 CONSIDIREÇÕES FINAIS

Foi possível observar que o tema de apresentado nesse artigo, tem sido muito importante para uma melhoria da produtividade e redução de custos na indústria de mineração. Sendo que a automação dos meios de produção vem para ajudar não só as indústrias de mineração como de outros setores. Durante a realização desse artigo científico foram encontradas diversas oportunidades de novas pesquisas em relação ao tema de automação, que possa melhorar não só a produção das indústrias de mineração como de indústrias de outros segmentos.

REFERÊNCIAS

ALVES, Sérgio. **A matemática do GPS**. Revista do professor de matemática 59, 2006. Acessado em 08/11/2022. Disponível em <https://www.ime.usp.br/~rpm/conheca/gps.pdf>

ARAUJO, E.R; FERNANDES, F.R.C. **Mineração no brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais**. 2016. Acessado em 27/09/2022. Disponível em http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1909/1/conflitos_ambientais_cap.2%20p65.pdf

BRUNDRETT, Scott. **Industry analysis of autonomous mine haul truck commercialization**. Simon Fraser university, Summer 2014. Acessado em 10/10/2022. Disponível em <https://docslib.org/doc/6562076/industry-analysis-of-autonomous-mine-haul-truck-commercialization>

CARNEIRO, José Luís. **Histórico e hardware**. Salvador, 2006. Acessado em 08/11/2022 Disponível em <https://www.jlcarneiro.com/wp-content/uploads/File/inf/hardware.pdf>

COUTO, Rui Torres da Silva. **Lavras a céu aberto e equipamentos principais**. Universidade do Porto. Dissertação de doutorado. 1990. Acessado em 06/04/2022 Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12227>

GIESE, Ellen Cristine. **Reflexões sobre os impactos do covid-19 no setor mineral**. 04/2022. Acessado em 28/09/2022. Disponível em <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/1332/1029>

GUBERT, T; GOMES S.M.S. **Recursos naturais não renováveis: procedimento contábil de duas empresas brasileiras**. 2010. Acessado em 28/11/ 2022. Disponível em <https://revistas.ufpr.br/rcc/article/view/21491/14141>

GUIEIRO, Gabriel Arthur; et al. **Implantação de caminhões fora de estrada autônomos na indústria de mineração**. 20° Simpósio de mineração. Vol. 20, num. 20. São Paulo (2019). Acessado em 28/09/2022. Disponível em <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/implantao-de-caminhes-fora-de-estrada-autnomos-na-indstria-de-minerao>

GLOBAL MINING GUIDELINE GROUP, GMG GOUP. **Guideline for implemetion of autonomous systems in mining**. 2019. Acessado em 28/09/2022. Disponível em https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2019/06/20181008_Implementation_of_Autonomous_Systems-GMG-AM-v01-r01.pdf

LOURENÇO, E.S; BAREA, E.R. A. **Rede wireless em sistemas de automação industrial**. 2011. Acessado EM 08/11/2022 Disponível em <https://www.fatecourinhos.edu.br/retec/index.php/retec/article/view/36/17>

MODULAR MINING. **O sistema de gerenciamento de frotas (fms) dispatch ajuda a mina a otimizar seu ciclo de transporte e a reduzir drasticamente os tempos de inatividade do caminhão**. 2022. Acessado em 13/12/2022 Disponível em <https://www.modularmining.com/pt-br/noticias-e-recursos/estudos-de-caso/o-sistema-de-gerenciamento-de-frotas-fms-dispatch-ajuda-a-mina-a-otimizar-seu-ciclo-de-transporte-e-a-reduzir-drasticamente-os-tempos-de-inatividade-do-caminhao/>

PARREIRA, Juliana. **An interactive simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system**. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. 2013. Acessado em 27/09/2022. Disponível em <https://open.library.ubc.ca/collections/24/items/1.0074111>

PRESSMAN, R.S; MAXIM, B.R. **Engenharia de software**. 07/2021. 9.ed. Acessado em 08/11/2022. Disponível em <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=FSE3EAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT33&dq=o+que+%C3%A9+software&ots=kzMQpWxGzK&sig=-097soGbksVRPT83FUaloSpS3Nk#v=onepage&q=o%20que%20%C3%A9%20software&f=false>

QUEVEDO, Joana Mirelle Gómez. **Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2009. Acessado em 06/04/2022. Disponível em <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/%2010183/163322/001023897.pdf?sequence=1>

RIVERA, Julio Renato Magri. **Efectos de la incorporación de tecnologías autónomas en el diseño y la planificación minera.** Santiago do Chile. 2014. Acessado em 27/09/2022. Disponível em <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131395/Efectos-de-lincorporacion-de-tecnologias-autonomas....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SELLTIZ, Claire et. al. **Métodos de pesquisa nas relações sociais.** São Paulo: Herder, 1967. Acessado em 25/10/2022. Disponível em <https://pesquisa.bvsalud.org/porta1/resource/pt/biblio-1074980>

SICILIANO, Bruno; KHATIB, OUSSAMA. **Springer handbook of robotics.** Springer, 2008. Acessado em 22/06/2022. Disponível em https://books.google.com.br/books?id=Xpqi5gSuBxsC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

SUBTIL, Robert F; et al. **A practical approach to truck dispatch for open pit mines.** 35 Th APCOM Symposium, 2011. Acessado em 06/09/2022. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/235613996_A_Practical_Approach_to_Truck_Dispatch_for_Open_Pit_Mines

VALE. **Vale terá a primeira mina operando somente com caminhões autônomos no brasil.** 2018. Acessado em 25/10/2022. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/vale-tera-a-primeira-mina-operando-somente-com-caminhoes-autonomos-no-brasil.aspx>