

ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE GNL COMO COMBUSTÍVEL DE CAMINHÕES OFF-ROAD

Marco Aurélio Dias Ferreira ¹

Edmilson Moutinho dos Santos ²

Hirdan Katarina de Medeiros Costa ³

Thiago Luis Felipe Brito ⁴

RESUMO

Caminhões off-road são empregados em minas a céu aberto e subterrâneas, para transporte de material sólido a pequenas e médias distâncias. Além da evidente vantagem de flexibilidade em sua utilização, esses caminhões proporcionam ainda a possibilidade de ciclos rápidos e vida útil média e longa. De modo geral, os seus motores funcionam tanto a Diesel como a GNL, e seu mecanismo é similar a um motor quatro tempos. Esses motores basicamente são máquinas que transformam energia térmica em energia mecânica. Dentre as inúmeras vantagens com relação ao uso do GNL, pode-se citar que esses caminhões emitem menores quantidades de gases do efeito estufa na atmosfera, com uma redução em torno de pelo menos 20%. Outro benefício é que possuem maior autonomia de combustível, pois podem percorrer cerca de 1.000 quilômetros sem reabastecimento. As análises econômicas de que tratam esse artigo, levaram à conclusão de que o investimento no uso do GNL em caminhões off-road é bastante viável de aplicação e que não se restringe a esses tipos de máquinas, mas pode também ser empregado a outros equipamentos presentes na mineração. Estimou-se um *payback* de aproximadamente três anos para o investimento em uma frota de 11 caminhões. Os ganhos ambientais e econômicos, somados à grande capacidade de densidade energética do GNL, mostram a sua enorme contribuição para os fins econômicos aos quais a sua utilização tem grande potencial de exploração.

Palavras-chave: Caminhões off-road, GNL, Motores, Análise Econômica, Ganhos Ambientais.

INTRODUÇÃO

Caminhões off-road são utilizados em minas a céu aberto e subterrâneas, para transporte de material sólido a pequenas e médias distâncias. Além da evidente vantagem de flexibilidade em sua utilização, os caminhões proporcionam ainda possibilidade de ciclos rápidos e vida útil média e longa. Em contrapartida, a desvantagem é a manutenção onerosa, que torna extremamente importantes investimentos amplos que aumentem a produtividade (Associação educacional Dom Bosco, 2013).

¹ Graduando do Curso de Geofísica da Universidade de São Paulo - USP, madiasf@usp.br;

² Professor do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo - SP, edsantos@iee.usp.br .

³ Professora do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo - SP, hirdan@usp.br

⁴ Doutor pelo Programa de Energia da Universidade de São Paulo - SP, thiagobrito@usp.br;

Dentre iniciativas que almejam melhorias no desempenho estão as que promovem mudanças na matriz energética desses caminhões. Destaca-se, por exemplo, o projeto australiano, divulgado pela Gas Energy Australia (2015), que efetuou testes de um protótipo de caminhão off-road movido a gás natural comprimido de alta densidade. Além disso, a revista especializada Australian Mining (VALIDAKIS, 2013) divulgou reportagem mostrando diversos benefícios do uso do gás natural liquefeito, chegando a concluir que o GNL pode inclusive superar o uso de diesel na indústria da mineração.

O gás natural é um combustível de origem fóssil, composto principalmente por hidrocarbonetos (carbono e hidrogênio). É encontrado no estado físico gasoso. No entanto, o processamento do gás natural pode alterar seu estado, transformando-o em gás natural liquefeito, também chamado de GNL que possui densidade em torno de $0,4 \text{ g/cm}^3$ e poder calorífico de 54 MJ/kg (FRANCISCO, 2010).

A obtenção do gás natural liquefeito se dá através da purificação do gás natural, em que a matéria-prima (gás natural) é submetida a uma temperatura de $-162 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo seu volume reduzido em aproximadamente 600 vezes. Durante esse processo, ocorre a condensação, ou seja, a passagem do estado gasoso para o líquido. Após esse procedimento, o gás natural é liquefeito, sendo composto principalmente por metano e, em menores proporções, por etano, propano, entre outros componentes encontrados no gás natural. Esse combustível incolor e inflamável deve ser armazenado e transportado de forma segura, visto que os riscos de acidentes são altos (FRANCISCO, 2010).

O GNL é empregado como combustível nas indústrias, veículos pesados e automóveis de passeio. Porém, para receber esse combustível, os automóveis devem passar por adaptações em locais credenciados, onde ocorrerá a instalação de um sistema formado por um reservatório, indicador de nível do reservatório e um vaporizador. Dentre os benefícios gerados pela utilização do gás natural liquefeito estão: facilidade de armazenagem, sua combustão libera menos gases poluentes, tem alta densidade energética, além de ser mais barato que o álcool e a gasolina (FRANCISCO, 2010).

Os Caminhões Off-Road são veículos projetados para situações que exigem maior necessidade do uso de força, para transporte, por exemplo. São utilizados de modo especial em terrenos muito irregulares e com solos pouco compactos, permitindo manobras em lugares menos acessíveis. Dessa forma, são capacitados para o transporte de grandes quantidades de cargas, o que beneficia o setor econômico operacional (COELHO, 2021).

Esse tipo de veículo off-road é largamente empregado nos setores de construção civil, mineração, indústria de celulose e madeireiras de modo geral, bem como no setor agrícola. Também é utilizado nos setores militares, como o exército e bombeiros (COELHO, 2021).

São mais comuns nas seguintes trações: 4x4, 6x4, 6x6, 8x6 e 8x8. A escolha da tração depende da necessidade de sua utilização, levando em consideração fatores como o peso do conteúdo a ser transportado, o volume da carga, a altura do próprio caminhão off-road, dentre outras características. Eles normalmente possuem uma aparência robusta e são bem resistentes e equipados com poderosos motores. Alguns modelos possuem inclusive transmissão automatizada (COELHO, 2021).

Dentre os modelos mais expressivos, alguns conseguem atravessar regiões alagadas de até um metro e meio de profundidade e são capazes de passar por vãos de até dois metros. Existem modelos robustos que também podem subir degraus de até sessenta centímetros e podem se deslocar com inclinação lateral de até 50% (COELHO, 2021). A Figura 1 mostra alguns exemplos de caminhões off-road com as características e peculiaridades citadas acima, como robustez, capacidade de carga e a utilização em locais de difícil acesso (COELHO, 2021).

Figura 1 - Imagens de caminhões Off-Road



Fonte: Montagem a partir de imagens coletadas nos sites da Pit&Quarry, L&T Construction & Mining Machinery e Carro de Garagem.

O objetivo é averiguar por meio de análise econômica, a viabilidade da utilização do GNL na indústria dos caminhões off-road, bem como em outros equipamentos em que possa

ser empregado, seja em mineração ou outros setores como construção civil, agrícola, indústria madeireira, dentre outras áreas de possível aplicabilidade.

METODOLOGIA

O processo de mineração é basicamente dividido em três estágios. São eles a extração, manuseio e processamento dos minérios. Cada um utiliza diferentes tipos de equipamentos ou meios de transporte. Para os fins deste estudo, se limitam os dados ao setor de manuseio, pois é onde se encontram os caminhões. A Tabela 1 apresenta os principais gastos energéticos dos equipamentos de manuseio de uma mina de carvão, de acordo com levantamento feito pelo departamento de energia dos Estados Unidos (EERE, 2007).

Tabela 1 - Gastos energéticos do manuseio de minérios.

	Quantidade	Horas/unidade	Btu/hora (unidade)	Btu/ton de material manuseado
Caminhão basculante	11	14	1.656.897	25.601
Carregador frontal	5	14	3.640.682	25.569
Tratores	2	14	5.115.421	14.371
Pick-ups	8	14	207.112	2327
Caminhões de serviço	2	14	339.364	953
Caminhões a granel	2	13,58	339.364	925

Fonte: (EERE, 2007)

Como o diesel é comumente utilizado como combustível veicular, é mais frequente sua comercialização em litros. Já no caso de GNL, que ainda não é tão frequentemente usado como combustível veicular, é mais comum sua comercialização por unidades de energia. Portanto, para estimativas de custos desse trabalho, alguns parâmetros serão utilizados para converter ambos para as mesmas unidades (EERE, 2007).

Para a análise econômica da adoção de um caminhão off-road à GNL, em comparação com óleo diesel, calculou-se o valor presente líquido e de payback. A avaliação simulou os gastos da substituição da frota de caminhões a diesel para uma movida a GNL.

Em ambas as análises, primeiramente, é necessária a estimativa de um valor do investimento no caminhão. Na Tabela 1 verifica-se que a produção diária total estimada de uma mina subterrânea nos EUA, baseado na soma das energias gastas na operação (perfuração, escavação, etc.) é de 9.967 toneladas por dia. Dividindo-se pelo total de horas trabalhadas e pelo número de caminhões, valores que também estão presentes na tabela, resulta-se que por hora cada caminhão transporta aproximadamente 64,7 toneladas. De acordo com a revista

(REIS, 2020) o preço de um modelo da marca Scania de capacidade 55 toneladas é de R\$ 950 mil o qual foi adotado para os cálculos (EERE, 2007).

Tabela 2: Dados utilizados neste estudo

Variável	Unidade	Valor
Quantidade por dia de toda mina	toneladas	9.967
Quantidade por ano	toneladas	2.631.288
Inflação	% ao ano	3%
Custo diesel	R\$/ton manuseada	2,55
Custo GNL	R\$/ton manuseada	1,28
Preço do caminhão	R\$	950.000
Quantidade de caminhões	Unidades	11
Toneladas transportadas por hora - por caminhão	toneladas/hora	64,7

Fonte: Produção do próprio autor

O valor estimado do diesel em março de 2020 é R\$3,608/l, de acordo com a ANP. Portanto, utilizando o valor da última coluna da Tabela 1, que é de 25601 Btu por tonelada de material manuseado, se faz a estimativa de que um gasto do diesel é de R\$2,55/ton. No mercado, o preço do GNL em janeiro de 2019 é estimado em US\$9,36/MMBtu (MME/EPE, 2019) e o dólar à R\$5,34 no mesmo período. Utilizando a mesma quantidade de energia gasta por tonelada de material manuseado, de 25601 Btu, esteve-se que o custo é de R\$1,28/ton.

O payback é o tempo (em anos) que se leva para recuperar um investimento realizado, sendo definido pela Equação 1.

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Lucro\ Médio\ Anual} \quad 1$$

Vamos analisar a seguir o funcionamento dos motores movidos a Diesel e posteriormente dos motores que utilizam o GNL, pois possuem mecanismos bastante similares. Iremos indicar também as suas vantagens, em especial à utilização do GNL, exemplificando um modelo de caminhão que funciona utilizando esses dois tipos de combustível.

REFERENCIAL TEÓRICO

De modo geral, os motores a Diesel funcionam como um motor quatro tempos. Eles possuem um mecanismo de combustão interna do tipo Otto e Diesel, constituídos por pelo menos um cilindro, contendo algumas peças móveis e um êmbolo móvel, chamado pistão

(SEARS et al., 2003). Esses motores basicamente são máquinas que transformam energia térmica em energia mecânica. Essa energia é adquirida a partir da combustão do diesel dentro do cilindro do motor. A grande diferença entre os motores movidos a diesel e os movidos a gasolina e álcool, é que nos primeiros a queima do combustível se dá a partir do calor liberado quando o ar é altamente comprimido no interior da câmara de combustão, enquanto nos últimos a combustão ocorre por meio de uma faísca produzida pela vela de ignição (SEARS et al., 2003).

Os mecanismos de funcionamento desse tipo de motor seguem algumas etapas. A primeira delas é denominada “admissão”. A câmara de combustão recebe uma mistura de combustível e ar que passa pela válvula de admissão, ao passo que o pistão se move de forma a aumentar o espaço dentro da câmara (SEARS et al., 2003). A segunda etapa é a “compressão”. O pistão realiza um movimento no sentido de comprimir a mistura de combustível e ar, diminuindo o seu volume. Isso acontece de forma a não trocar energia térmica com o meio externo (compressão adiabática). Logo após, a máquina térmica recebe calor em um processo de transformação isocórica, ou seja, o volume e a massa da mistura são mantidos estáveis enquanto sua temperatura e sua pressão variam (SEARS et al., 2003).

A terceira etapa chama-se “combustão” na qual, após o término da compressão, é gerada uma centelha a partir de um dispositivo elétrico. Essa centelha gera uma explosão da mistura dentro do dispositivo e sua posterior expansão (SEARS et al., 2003). Na quarta e última etapa ocorre a abertura da válvula de saída. Esse tempo da máquina denomina-se “exaustão”, onde o gás queimado na fase anterior, devido à explosão da mistura, é levado para fora da máquina. Aqui ocorre a expansão adiabática, ou seja, a máquina perde calor e retorna ao seu estado inicial, onde o ciclo se reinicia novamente (SEARS et al., 2003).

Os modernos caminhões movidos a gás natural liquefeito (GNL) tem o seu funcionamento bastante similar aos que possuem motores de combustão interna movidos a diesel tradicionais. De maneira geral, o sistema de funcionamento começa pela entrada nos cilindros do GNL armazenado no tanque de combustível. A partir desse ponto, o sistema eletrônico de injeção libera uma centelha que favorece a ignição, e esse processo permite a produção de uma força mecânica que é transmitida para os pneus (CBIE, 2019).

Esses caminhões movidos a GNL possuem, em termos de potência e eficiência energética, grande competitividade com os caminhões movidos à diesel. A grande vantagem é que, por ser líquido, o GNL possui uma densidade energética muito elevada, pois uma maior quantidade de GNL pode ser armazenado num espaço menor. Existem outras duas vantagens

nesses motores. A primeira delas é que esses caminhões emitem menores quantidades de gases do efeito estufa na atmosfera, com uma redução em torno de pelo menos 20%. A outra vantagem é que possuem maior autonomia de combustível, pois podem percorrer cerca de 1.000 quilômetros sem reabastecimento (CBIE, 2019).

Um bom exemplo é o caminhão da Volvo. O modelo movido a GNL apresenta 10% menos emissões de CO₂, possui o mesmo rendimento comparado ao modelo movido a diesel, além de um custo menor e com 50% a mais de autonomia. O detalhe é que ele pode rodar também utilizando o diesel, mas sem os mesmos ganhos econômicos e ambientais oferecidos com o uso do GNL (CZERWONKA, 2013). Em comparação aos motores que utilizam o gás com vela de ignição, esse modelo desenvolvido pela Volvo utilizando o GNL possui uma eficiência de 30% a 40% a mais. Isso significa uma redução de consumo de combustível de 25%. Com o tanque cheio de GNL, é possível percorrer uma distância de até 600 km (CZERWONKA, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados indicam que o valor de investimento seria pago pela economia em energética, com um *payback* de aproximadamente três anos e 2 meses (3,13 anos). Como a vida útil desses caminhões é de 4 a 5 anos, a primeira avaliação mostra que a troca seria vantajosa. A segunda avaliação feita foi a de Valor Presente Líquido. Essa difere da análise de Payback por considerar uma taxa de juros ao decorrer do ano que deprecia o valor da moeda. Da Tabela 1, se sabe que é necessário um total de 11 caminhões para o funcionamento da mina. Portanto o investimento que foi considerado para a troca total da frota é de R\$10.450.000, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Faturamento e resultados obtidos em 5 anos

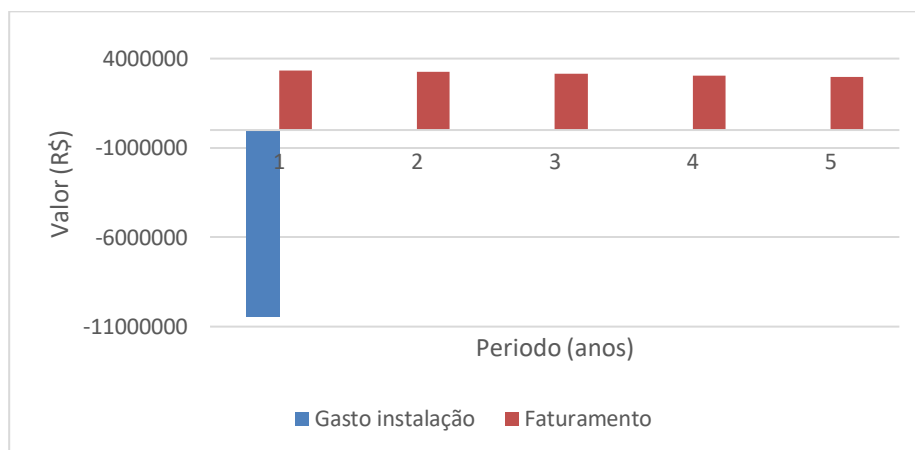
Resultados	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Gasto de instalação	R\$ -10.450.000				
Faturamento	R\$ 3.341.735	R\$ 3.244.403	R\$ 3.149.906	R\$ 3.058.161	R\$ 2.969.088
Saldo	R\$ -7.108.264	R\$ -3.863.860	R\$ -713.954	R\$ 2.344.207	R\$ 5.313.296

Fonte: Produção do próprio autor

O faturamento a cada ano foi calculado pela economia obtida pela troca. A partir da diferença do preço por tonelada do diesel e do GNL multiplicada pela quantidade de material

extraído no período e aplicado o valor de inflação estimado, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 3 e Figura 2.

Figura 1 - Gráfico do fluxo de caixa



Fonte: Produção do próprio autor

Verifica-se que, à uma taxa um pouco superior à da inflação dos últimos anos, de 3%, o total da soma dos resultados dos 5 anos estudados é superior a zero. Tal análise corresponde a um valor positivo do VPL (Valor Presente Líquido).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises econômicas, constata-se que o investimento é viável para aplicação ou que no mínimo estimule estudos práticos do uso de caminhões movidos a GNL. Constata-se também que as vantagens econômicas provenientes do uso de GNL podem ser aplicadas a outros equipamentos presentes na mineração, além de caminhões off-road no setor da mineração. No tópico de levantamento energético se mostrou diversos outros equipamentos a diesel com grandes gastos de energia, que podem viabilizar ainda mais a aplicação da tecnologia de GNL nas atividades mineradoras. Além disso, os ganhos ambientais e econômicos, somados à grande capacidade de densidade energética do GNL, mostram a sua enorme contribuição para os fins econômicos aos quais a sua utilização tem grande potencial de exploração.

As perspectivas futuras do uso do GNL mostram um cenário onde o mercado desse combustível tende a favorecer mais os compradores que os vendedores. A grande oferta de GNL possibilita maior poder de barganha de seus compradores, de modo a propiciar maior

flexibilização de algumas cláusulas de contrato de longo prazo, tornando esse mercado com características de maior liquidez e flexibilidade (INFOPETRO, 2019).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do Projeto Gasbras Rede de P&D Finep 01.14.0215.00, através da concessão de bolsa de pesquisa. Agradecemos o apoio do RCGI – Research Centre for Gas Innovation, localizado na Universidade de São Paulo (USP) e financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/50279-4) e Shell Brasil, e a importância estratégica do apoio dado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) através do incentivo regulatório associado ao investimento de recursos oriundos das Cláusulas de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação. Agradecemos o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015 (PRH 33.1 - Referente ao EDITAL Nº 1/2018/PRH-ANP; Convênio FINEP/FUSP/USP Ref. 0443/19).

REFERÊNCIAS

CBIE. **Como funcionam caminhões a GNL?** Disponível em:

<<https://cbie.com.br/artigos/como-funcionam-caminhoes-a-gnl/>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

COELHO, A. M. **Caminhão off road! Grande é pouco! - Carro de Garagem.** Disponível em: <<https://www.carrodegaragem.com/caminhao-off-road/>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

CZERWONKA, M. **Volvo apresenta caminhão movido a GNL - Portal do Trânsito.**

Disponível em: <<https://www.portaldotransito.com.br/noticias/volvo-apresenta-caminhao-movido-a-gnl/>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

EERE. Mining Industry Energy Bandwidth Study. **Office of Energy Efficiency and Renewable Energy - US Department of Energy**, p. 47, 2007. Disponível em:

<https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/mining/pdfs/mining_bandwidth.pdf>.

FRANCISCO, W. de C. e. **Gás Natural Liquefeito - Brasil Escola.** Disponível em:

<<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/gas-natural-liquefeito.htm>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

GAS ENERGY AUSTRALIA. **Industry “Game Changer” Brings CNG to Mining Sector | NGV Global.** Disponível em: <<http://www.ngvglobal.com/blog/industry-game-changer-brings-cng-to-mining-sector-0601>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

INFOPETRO. Os novos rumos do mercado de GNL: uma visão sobre a flexibilidade dos grandes compradores asiáticos - Inep – Instituto de Estudos de Estudos Estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://inep.org.br/os-novos-rumos-do-mercado-de-gnl-uma-visao-sobre-a-flexibilidade-dos-grandes-compradores-asiaticos320425/>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

MME/EPE. Informe - Comparações de Preços de Gás Natural: Brasil e Países Selecionados. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-369/INFORME - Comparações de Preços de Gás Natural.pdf>>.

REIS, S. **Scania amplia linha de caminhões off-road com versão G 540 10x4.** Disponível em: <<https://www.automotivebusiness.com.br/noticia/31753/scania-amplia-linha-de-caminhoes-off-road-com-versao-g-540-10x4->>. Acesso em: 16 abr. 2021.

SEARS, F. W. et al. **Física II: Termodinâmica e Ondas.** 10. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2003.

VALIDAKIS, V. **LNG to overpower diesel on mine sites - Australian Mining.** Disponível em: <<https://www.australianmining.com.au/features/lng-to-overpower-diesel-on-mine-sites/>>. Acesso em: 16 abr. 2021.