

CUSTO ENERGÉTICO DO BOMBEAMENTO DE POLPA DE MINÉRIO DE FERRO – UM ESTUDO DE CASO

Igor Moreira de Carvalho¹ ; Edna Maria de Faria Viana² & Carlos Barreira Martinez³

RESUMO – O bombeamento de polpa de minério de ferro por meio de dutos é considerado uma atividade confiável, segura e de baixo custo, o conhecimento do custo energético associado a essa atividade se faz fundamental para a previsibilidade da demanda de energia, bem como o controle do processo. Neste artigo, o custo de bombeamento de minério de ferro da empresa Samarco S.A é analisado relacionando o volume de toneladas métricas secas com o kWh consumido pelas estações de bombeamento.

ABSTRACT– Pumping iron ore slurry through pipelines is considered a reliable and safe activity. The knowledge of the energy cost associated with this activity is essential for the predictability of energy demand, as well as process control. In this article, the cost of pumping iron ore at Samarco S.A is analyzed by relating the volume of dry metric tons to the kWh consumed by the pumping stations.

Palavras-Chave – Custo de bombeamento, Mineroduto, Polpa de minério de ferro.

INTRODUÇÃO

O custo do transporte de minério de ferro é um dos custos que mais impactam no preço final do produto. Nesse sentido, em busca de maior competitividade, empresas procuram realizar essa atividade de forma mais eficiente e econômica, diversificando a modalidade de transportes. Em um passado não tão distante, o transporte via dutos era visto como uma atividade intrigante e arriscada. Entretanto, atualmente, com a viabilização através do avanço da tecnologia e da engenharia, é citada como uma das atividades mais seguras, confiáveis e econômicas, Wasp *at al.* (1997). Apesar do alto custo fixo de investimento inicial, o transporte dutoviário apresenta maior vantagem econômica quando comparado a outros modais para grandes volumes de produtos à grandes distâncias Fabroa *at al.* (2014). Isso porque, após a instalação dos dutos, o custo variável é relativamente baixo e a demanda de produção normalmente é constante, o que promove maior confiabilidade operacional e menor interferência por fatores externos, Machado *at al.* (2005). De acordo com Gomes (2012), o uso do modal dutoviário se iniciou na América do Norte, por volta de 1865, e atualmente, é

1) PPGMEC / UFMG - Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, +55 (31) 3409-5145, igormcarvalho2@gmail.com.

2) PPGMEC / UFMG - Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, +55 (31) 3409-5145, ednaviana2601@gmail.com.

3) IEM/MPEH / UNIFEI. LTHE/UNIFEI. Rua Coronel Francisco Braz, 112. Itajubá / MG; +55 (35) 3629-1101, cmartinez@unifei.edu.br.

empregado em nível mundial, em sua maioria destinados ao transporte de polpa de minério, óleo e gás. Apenas as malhas destinadas a óleo e gás já representam aproximadamente um montante de 4,0 milhões de quilometro de dutos.

A confiança no modal dutoviário também pode ser vista no Brasil por parte da mineração. Nas últimas décadas, o número de minerodutos construídos no país teve um aumento significativo Torres (2021). O transporte de polpa de minério é tido como de baixo impacto ambiental uma vez que o material bombeado é considerado como inertes e não perigosos pelos critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Segundo Abulnaga (2021), a polpa pode ser definida essencialmente como uma mistura de sólidos e líquidos, ou seja, um fluído, geralmente água, que transporta partículas sólidas granulares em suspensão. Estas partículas sólidas podem ser constituídas de diversos materiais dependendo do tipo de mineração. No Brasil, os minerais mais comuns são: concentrado de minério de ferro, bauxita, fosfato, cobre e carvão, Chaves (2012). Na tabela 1 a seguir, são apresentados os principais minerodutos do Brasil, o mineral constituinte da polpa, a capacidade de produção anual, bem como a extensão, diâmetro do duto e o início de sua operação.

Tabela 1 –Principais minerodutos do Brasil.

Empresa	Mineral	Capacidade (Milhões tms/ano)	Extensão [km]	Diâmetro nominal [in]	Início da operação
Hydro	Bauxita	13,2	244	24	2006
Anglo Minas-Rio	Ferro	24,5	522	24 e 26	2014
Samarco Linha 1	Ferro	15,5	398	18, 20 e 22	1977
Samarco Linha 2	Ferro	8,5	400	16 e 14	2008
Samarco Linha 3	Ferro	23	400	20 e 22	2014
Vale – Pico - VG	Ferro	7,5	5	12	2009
ValeFert(Fosfertil)	Fosfato	2	120	9	1978
ValeFert(Goiasfertil)	Fosfato	0,9	14	6	1981
Imerys RCC	Caulim	1,2	159	14	2002
Imerys PPSA	Caulim	1,3	180	10	1996

Fonte: Adaptado de TORRES et al., 2015

No que se refere aos minerodutos, um importante parâmetro a ser monitorado é a análise da perda de carga, que está relacionada à perda de energia por atrito viscoso/turbulento em dutos de transporte de polpa. Essa perda é resultante do contato das partículas de minério contidas na polpa com a parede da tubulação, que dissipam a energia resultando na queda de pressão ao longo do escoamento e conseqüentemente, reduz a capacidade de bombeamento, Madagascar (2014). Para o transporte da polpa são necessárias estações de bombeamento, que são compostas normalmente por um sistema de tanques de abastecimento com agitadores, bombas centrifugas de carga e bombas principais de deslocamento positivo, que impulsionam a polpa para o duto. É possível observar

também, em alguns casos, estações de monitoramento de pressão e sistemas de proteção catódicas, distribuídos ao longo da extensão do duto, além de estações de válvulas para controle da pressão.

MINERODUTO SAMARCO

Conforme apresentado na tabela 1, a Samarco Mineração S.A possui três linhas de minerodutos para bombeamento de polpa de minério de ferro concentrado. Cada um com aproximadamente 400 km de extensão, construídos em uma faixa de servidão com 35 metros de largura, percorrendo em torno de 25 cidades entre a sua área de extração, em Mariana (MG), e a usina de pelotização e o porto, em Anchieta (ES), representados na figura 1, AUSENCO (2012).



Figura 1 – Samarco – rota dos minerodutos da Samarco S. A

Para o deslocamento da polpa, conforme figura 2, a Samarco Mineração S.A conta com duas estações de bombeamentos (EB's) para cada um dos minerodutos, uma localizada na unidade de Germano em Mariana (MG) e Ouro Preto (MG), e outra no município de Matipó (MG). Além disso, a empresa trabalha com duas estações de válvulas (EV's), destinadas ao controle da pressão dinâmica ao longo da linha, localizadas nos municípios de Guaçuí (ES) e outra em Alegre (ES), AUSENCO (2012).

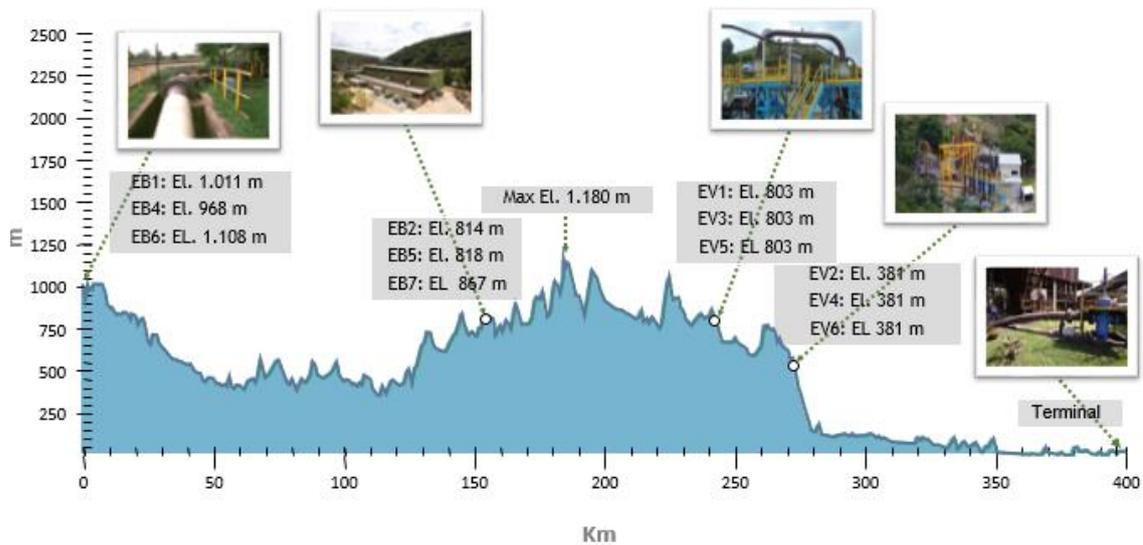


Figura 2 – Samarco – perfil com as elevações dos três minerodutos

Como foco deste estudo, serão apresentadas informações sobre o mineroduto 2 da Samarco S.A, que teve sua operação iniciada em 2008, para uma capacidade de bombeamento de 8,5 Mtms/ano. A tubulação deste mineroduto apresenta composição de aço carbono e atende as especificações da norma API 5L X70, seu diâmetro varia de entre 355,6mm (14”) e 406,4mm (16”) e opera com velocidade média de 1,5 m/s, dependendo do número de bombas em operação Mattioli (2016). Na figura 3, pode-se observar o fluxo operacional esquemático do mineroduto 2, que é composto por duas estações de bombeamento EB4 e EB5, e duas estações de válvulas EV3 e EV4.

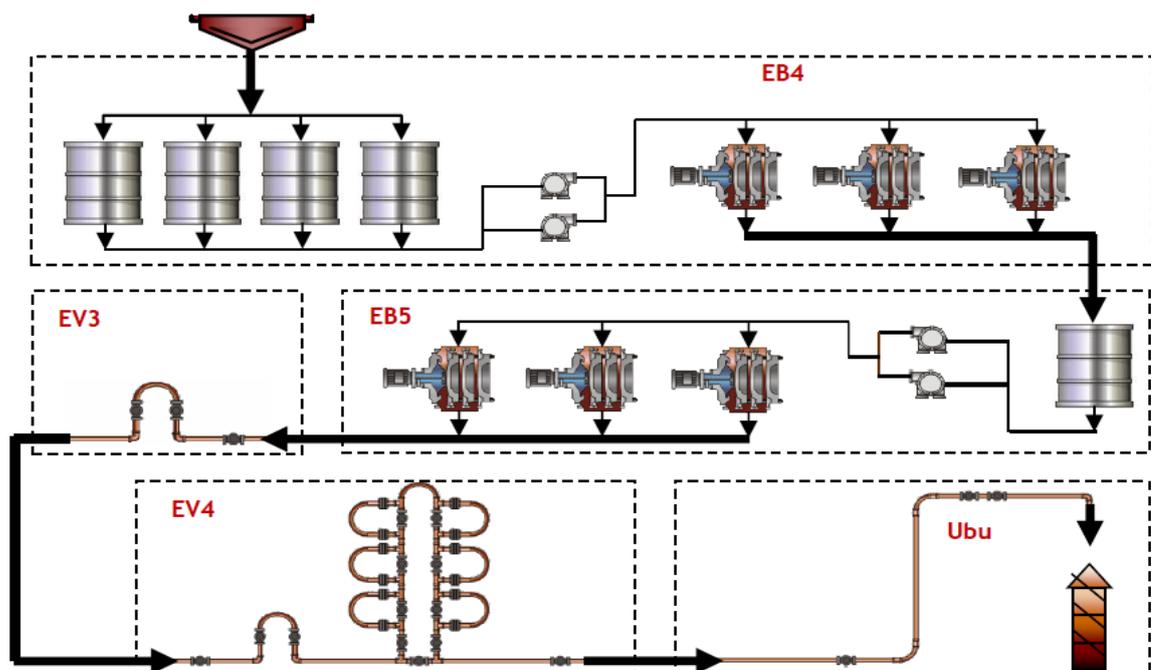


Figura 3 – Samarco – fluxo operacional esquemático do mineroduto 2

O processo se inicia nos tanques de estocagem em EB4, cada um com capacidade de 3.110 m³ e agitadores de 148 kW, onde a polpa é estocada e agitada, impedindo a sedimentação das partículas sólidas no fundo do tanque. Esse sistema possui fonte interrupta de energia, em caso de falha no abastecimento na planta, geradores de emergência são acionados imediatamente. Nos casos de manutenção ou falhas nos agitadores, o tanque é drenado completamente.

Após os tanques, a polpa passa por uma das bombas centrífugas que são instaladas a montante das bombas principais, dado ao fato de que as principais necessitam de uma pressão mínima de sucção acima da altura de coluna do fluido disponível nos tanques. Uma das bombas é usada paralelamente para redundância e manobras de processo, cada uma com potência de aproximadamente 220 kW. Em seguida, a polpa é bombeada para a tubulação, impulsionadas por três bombas principais Geho (1840 kW) de deslocamento positivo que são instalas em paralelo, cada uma com capacidade de 338 m³/h com uma pressão na descarga da estação de bombas de 155 kgf/cm², Vidal (2011).

Na sequência, percorrido 153 km de tubulação, a polpa chega a segunda estação de bombeamento, EB5 em Matipó. Esta estação é um espelho da EB4, mas conta com apenas um tanque de armazenamento, que é usado para tornar o processo mais flexível, dividindo o bombeamento em duas seções: seção 1, de Germano a Matipó; e seção 2, de Matipó a Ubu. Existe também a opção de bombear o sistema interligado, mas essa prática raramente é utilizada, uma vez que o sistema fica dependente do bom funcionamento de ambas as estações, AUSENCO (2012); Mattioli (2016).

Atualmente, o mineroduto 2 é o gargalo do processo produtivo da Samarco, sua capacidade de bombeamento é inferior a alimentação de minério transferida da usina de beneficiamento, isso exige a máxima capacidade de utilização do mesmo, com uma taxa de 99,7% de utilização. O sistema de bombeamento é sempre contínuo, no momento em que o mineroduto não está bombeando polpa, ele bombeia água. Isso pode ocorrer em casos de parada de manutenção na usina ou quando a mesma opera com vazão inferior à capacidade mínima de bombeamento do mineroduto.

CONSUMO ENERGÉTICO

A indústria da mineração é composta por diversas atividades com alto consumo de energia. Segundo Holmberg (2017), estima-se que o consumo total energético destas atividades equivale 6,2% do consumo total global de energia. Os processos físicos e químicos da extração até a pelotização demandam um alto nível deste insumo, sendo os principais: moagem (32%), transporte (24%), ventilação (9%) e escavação (8%).

Nesse sentido, em busca de um maior controle do consumo de energia elétrica do mineroduto 2 bem como maior previsibilidade da demanda de energia, este trabalho tem o objetivo de identificar o consumo de energia elétrica em função do bombeamento em toneladas métricas secas (tms). Para isso, foram analisados os dados destas variáveis entre janeiro de 2021 a abril de 2022, ou seja, uma amostra de 473 dias.

A partir destes dados foi possível observar que de modo geral, o consumo de energia apresenta um valor constante com uma média de 87.690 kWh por dia (figura 3) bem como, o bombeado com uma média de 22.440 tms por dia (figura 4). Os equipamentos com maior participação no consumo de energia elétrica do mineroduto são os agitadores, as bombas de carga e as bombas principais. Em situações normais, o mineroduto, opera com 4 agitadores de tanques, 1 bomba de carga e 3 bombas principais em EB4 e, 1 agitador de tanques, 1 bomba de carga e 3 bombas principais em EB5. No entanto, existem situações adversas que fogem do padrão e previsibilidade de demanda.

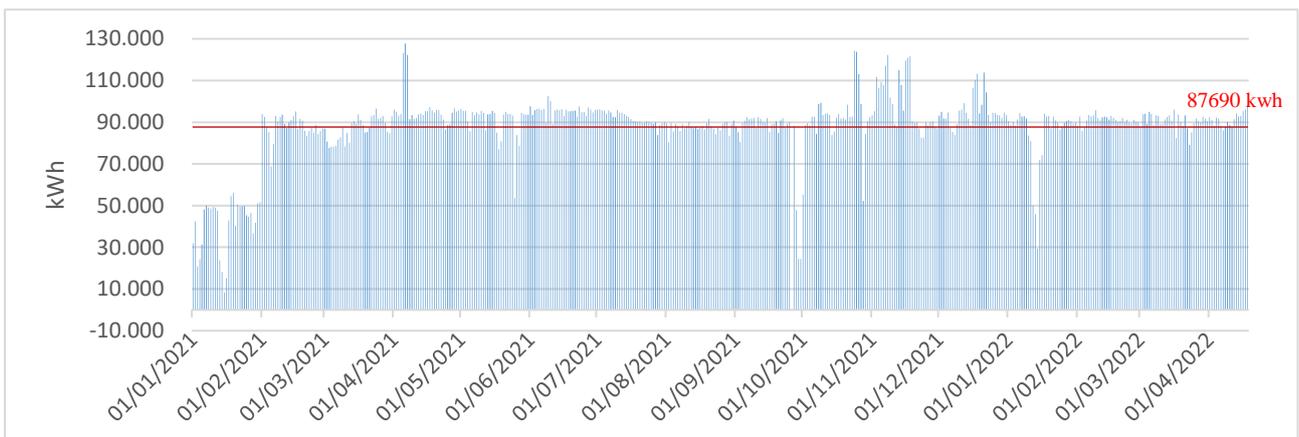


Figura 3 – Autor – consumo de energia elétrica no período de jan/2021 a abr/2022

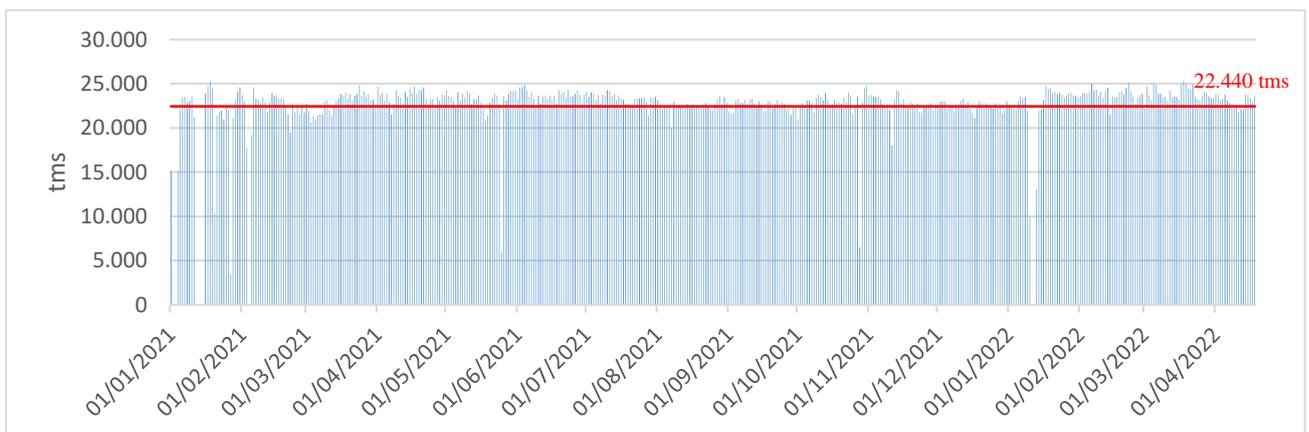


Figura 4 – Autor – bombeado de polpa período de jan/2021 a abr/2022

Alguma dessas situações, denominadas *outliers*, foram analisadas e estudadas. E serão apresentadas a seguir: Nesse período foi possível observar algumas situações de bombeamento de água com dois cenários de consumo de energia. No primeiro, com ocorrência em janeiro de 2021, houve bombeamento de água para passagem de equipamento de inspeção interna de dutos (*PIG's*), nessa ocasião, os equipamentos utilizados foram as bombas principais e a bomba de carga, uma vez que os tanques estavam vazios e os agitadores desligados, conseqüente mente, o consumo de energia ficou inferior à média. No segundo caso, com ocorrência em datas pontuais, houve bombeamento de água e estocagem de polpa em 4 tanques, essa situação, do ponto de vista energético, é a pior possível, tendo em vista o alto consumo de energia para uma atividade que não é rentável para empresa. Outras situações observadas nesse período foram, as paradas gerais de manutenção, com nenhum volume de bombeamento e consumo baixo de energia. E por fim, o bombeamento contínuo de polpa com três tanques vazios. Nesse último, apresenta volume médio de bombeamento com redução do consumo de energia por parte dos agitadores.

Desconsiderando estes *outliers* que não representam a normalidade de operação do mineroduto, foi possível chegar a uma relação de bombeado por consumo de energia (kWh /tms), figura 5:

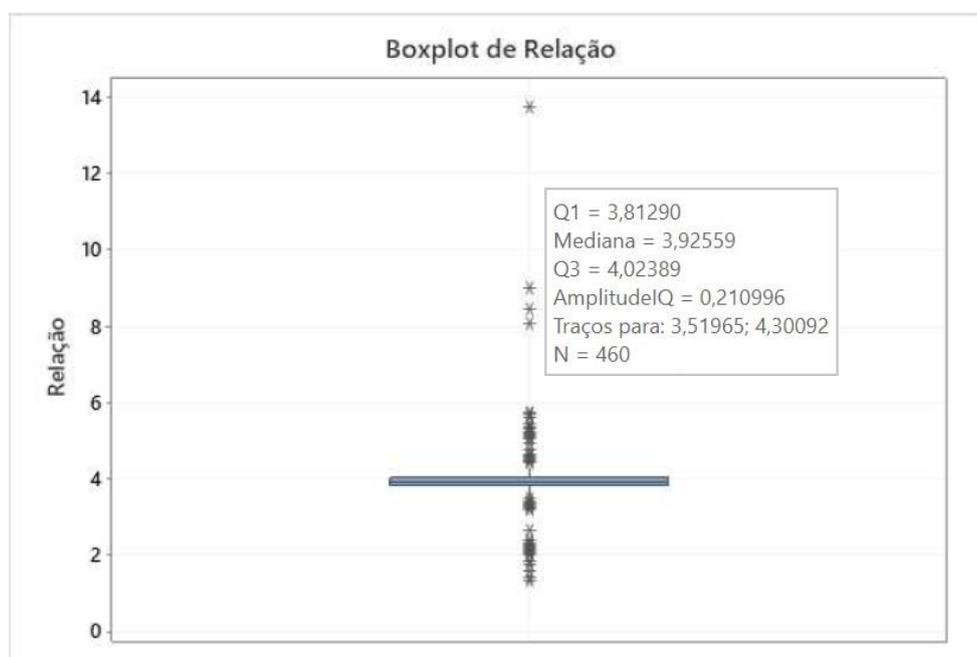


Figura 5 – Autor – Boxplot da relação de kWh /tms

De acordo com a figura 6, foi possível identificar 13 ocasiões de *outliers* para uma amostra de 473 dias, e uma relação do consumo de 3,9 kWh para cada 1 tonelada métrica seca bombeada.

Método

Hipótese nula	Todos os valores de dados são provenientes da mesma população normal
Hipótese alternativa	O menor ou o maior valor dos dados é um outlier
Nível de significância	$\alpha = 0,05$

Teste de Grubbs

Variável	N	Média	DesvPad	Min	Máx	G	P
Relação	460	3,9283	0,8022	1,3342	13,7546	12,25	0,000

Outlier

Variável	Linha	Outlier
Relação	20	13,7546

Figura 6 – Autor – Análise de outliers

Diante do exposto, o valor encontrado para o custo energético de bombeamento de polpa de minério de ferro é de R\$ 2,27 por tonelada métrica seca, levando em conta a tarifa de energia elétrica média praticada no Brasil, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 – Custo da tarifa média de energia no mundo

Países	Custo do MWh [US\$]	Custo do kWh [US\$]	Custo do kWh por tms [US\$]	Custo do kWh por tms [R\$]
Suécia	63	0,063	0,25	
EUA	69	0,069	0,27	
Finlândia	79	0,079	0,31	
Turquia	84	0,084	0,33	
Canadá	84	0,084	0,33	
Holanda	86	0,086	0,34	
Nova Zelândia	87	0,087	0,34	
México	90	0,09	0,35	
Dinamarca	92	0,092	0,36	
Coreia do Sula	100	0,1	0,39	
Áustria	105	0,105	0,41	
Grécia	107	0,107	0,42	
França	109	0,109	0,43	
Brasil	113	0,113	0,44	2,27
Espanha	116	0,116	0,46	
Suíça	122	0,122	0,48	
Reino Unido	126	0,126	0,50	

Fonte: Adaptado de ABRADEE, 2020

CONCLUSÃO

O consumo de energia apresentado nesse estudo de caso tem uma característica bastante constante ao longo do tempo. Entretanto ainda existem diversos cenários que podem impactar na

previsibilidade de sua demanda. Nem sempre um mineroduto opera a maior parte do ano em condições normais. Para entender melhor, as atividades que fogem dessa normalidade, é fundamental uma análise específica para a condição de operação de cada mineroduto. Nesse estudo em questão, com a alta taxa de utilização do mineroduto 2, foi possível identificar pontualmente cada ocasião de *outlier*, mas isso nem sempre é uma realidade. Em alguns casos, como de bombeamento intermitente de água e polpa em um mesmo dia, é necessária uma análise de amostras de dados a cada hora, o que pode tornar essa análise difícil em função do banco de dados disponível. De posse do dado encontrado será possível determinar o consumo de energia a partir do plano de bombeamento de polpa, bem como trabalha com um contrato de demanda de energia próximo da realidade praticada, evitando despesas desnecessárias. Ou mesmo, identificar possíveis problemas operacionais e falhas de equipamento em caso de consumo de energia que ultrapasse a demanda prevista. Também foi possível observar que o componente de energia elétrica não apresenta um peso muito significativo no custo do produto bombeado. Nesse sentido, pode ser interessante associar esse custo aos custos de manutenção, operação e a carga de impostos de forma a se ter um panorama dos reais componentes do custo do minério disponibilizado no ponto de embarque para exportação.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à UNIFEI, ANEEL, CEMIG, à ELETROBRÁS FURNAS, a FAPEMIG e SAMARCO pelo suporte para realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE. (2020). “*Comparação Internacional De Tarifas De Energia Elétrica*”. Brasília DF. 34 p.
- ABULNAGA, B. (2021). “*Slurry Systems Handbook*”. MC Graw Hill, 913 p. 304.
- AUSENCO PSI. (2012). “*Filosofia operacional e de controle do Mineroduto 2*”. Belo Horizonte - Samarco, 50 p.
- CHAVES. A. P. (2012). “*Bombeamento de Polpa e Classificação*”. Oficina de Textos,
- FABROA, J. A. (2014). “*A MILP (Mixed Integer Linear Programming) decomposition solution to the scheduling of heavy oil derivatives in a real-world pipeline*”. Computers and Chemical Engineering, pp.124–138.
- GOMES, H. A. (2012). “*Dimensionamento De Mineroduto*”. UFMG Belo Horizonte – MG, 67 p.

- HOLMBERG, K. (2017). “*Global Energy Consumption Due To Friction And Wear In The Mining Industry*”. Elsevier: Tribology International, pp. 116 – 139.
- MACHADO, A. O., CAMPOS, R., FERREIRA, A. R. (2005). “*Características De Modais De Transporte E Influências Nos Custos E Nível De Serviços Logísticos*”. XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Campo Grande, Set. 2005. 13 p.
- MADAGASCAR, A. (2014). “*Operações com Terminais e navios na indústria do petróleo*”. Brasil: biblioteca24horas, 138 p.
- MATTIOLI, G. G. (2016). “*Avaliação da corrosão interna em minerodutos brasileiros para transporte de minério de ferro*”. UFMG Belo Horizonte – MG, 192 p.
- TORRES, A. S. G. (2021). “*Inertização de minerodutos para mitigação de sua corrosão interna*”. UFMG Belo Horizonte – MG, 81p.
- TORRES, A. S. G., SILVA, C. C., VIEIRA, P. R. G., ANDRADE, R. B. N. (2015). “*Samarco’s evolution on erosion rate calculation method*”. Rio de Janeiro: Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute – IBP, pp. 22 – 24.
- VIDAL, A. M. (2011). “*Estudo de Bombeamento de Partículas Grossas*”. UFMG Belo Horizonte – MG, 68 p.
- WASP, E. J. (1977). *Slurry Pipeline Transportation*. Trans Tech Publications, 223p.