

Estudo de Viabilidade de Geração Hidrelétrica em Tubulações na Mineração

Thaissa O. Naves*. Lucas R. de Lima*.

*Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Elétrica,
Pça. Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36307-352, São João del Rei, MG, Tel: (32)3379-5870
e-mails: oliveiranavesthaissa@gmail.com.br, lucasrlima@ufsj.edu.br

Abstract: Electric energy generated in hydraulic pipelines has become a relevant alternative for the integration of renewable energy sources, and for the scenario of distributed energy generation. It is a continuous and environmentally impact-free source of clean energy, not featuring, in most cases, the intermittence found in energy generation. An important advantage of this system is the high pressure in the water pipelines that currently are solved using pressure-reducing valves. These valves can be replaced for hydraulic turbines, which are installed in the pipelines and produce electric energy. This work aims to study the application of this way of distributed energy generation through an analysis of feasibility based on the water distribution sector. Furthermore, it seeks to collect data on the potential of hydroelectric energy generation in an iron ore mine. For that, the software EPANET was used and the economic feasibility of the application of turbogenerators, turbines, and pumps as turbines (PATs) was evaluated.

Resumo: A energia elétrica gerada em tubulações tem se tornado uma alternativa relevante para a integração de fontes de energia renováveis e para o cenário de geração distribuída de energia. Trata-se de uma fonte de energia limpa, contínua e sem impactos ambientais, não possuindo, na maioria dos casos, a intermitência na geração de energia. Uma importante vantagem deste sistema é referente à alta pressão nas tubulações de água que atualmente são solucionadas com válvulas de redução de pressão. Estas válvulas podem ser substituídas por turbinas hidráulicas instaladas nas tubulações e produzirem energia elétrica. Este trabalho objetiva estudar a aplicação dessa forma de geração distribuída de energia, por meio de uma análise de viabilidade baseada no setor de distribuição de água. Além disso, visa realizar um levantamento do potencial de geração de energia hidrelétrica em uma mineração do ramo de minério de ferro. Para isso, o software EPANET foi utilizado e a viabilidade econômica da aplicação de turbogeradores, turbinas e bombas funcionando como turbina (BFTs) foi avaliada.

Keywords: Pipelines; Distributed generation; EPANET; Turbogenerators; Turbines; PATs.

Palavras-chaves: Tubulações; Geração Distribuída; EPANET; Turbogeneradores; Turbinas; BFTs.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica produzida no Brasil apresenta uma característica predominantemente hidráulica. Apesar de ser considerada confiável, robusta e, principalmente, renovável, a produção hidrelétrica se torna cada vez mais dependente das aflúências, que resultam das chuvas. Essa dependência, evidencia a necessidade de uma maior diversificação da matriz energética brasileira, com a inserção de outras fontes de geração de energia distribuída, como a eólica, a solar, da biomassa entre outras.

Geração Distribuída (GD) são centrais geradoras de energia elétrica com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas.

A presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, como a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, o baixo impacto

ambiental, a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada, redução das perdas devido à geração próxima das cargas e a diversificação da matriz energética. Por outro lado, há algumas desvantagens, como o aumento da complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico e a eventual incidência de tributos (ANEEL, 2016).

No Brasil, a modalidade de Geração Distribuída foi regulamentada em 2012 pela ANEEL. Em 2015, foi aprimorado, de modo a tornar o processo de conexão mais célere e ampliar o acesso à GD para um número maior de unidades consumidoras. O aumento do poder de escolha tem se materializado através da popularização das tecnologias de geração distribuída, sendo classificadas em Micro e Minigeração distribuída.

Microgeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 (kW) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

Minigeração distribuída é a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 (kW) e menor ou igual a 5 (MW) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

Dentro deste contexto de GD, além das formas de aproveitamento das fontes convencionais e renováveis de energia, atualmente a geração de energia utilizando microturbinas (Sosnoski, 2015) ou bombas funcionando como turbinas (BFTs) (Ramos *et al.*, 2010) em tubulações dos sistemas de distribuição de água urbanos ou em áreas industriais estão se tornando particularmente interessantes em locais na qual o excesso de pressão do sistema possa ser transformado em energia limpa e sustentável (Casini, 2015).

Esses equipamentos, por serem fabricados em série e escala, apresentam menores custos (Viana *et al.*, 2004), têm sua robustez e tecnologia de produção difundida, representando uma vantagem econômica sobre grupos de geradores convencionais, normalmente fabricados a partir das especificações definidas para um empreendimento em estudo.

No entanto, sabe-se que a instalação de microturbinas ou BFT na rede de distribuição de água aumenta a perda de carga, o que poderia comprometer as pressões e as vazões em pontos específicos. O desafio a ser enfrentado é o de determinar as condições técnicas em termos de dimensionamento, localização e condições operacionais para se obter a maior eficiência na produção de energia, sem comprometer o desempenho do sistema hidráulico.

Este artigo consiste em analisar técnica/econômica uma nova forma de geração distribuída de energia que atualmente é pouca explorada baseada na utilização de tubulações existentes de distribuição de água. A ideia é converter o excesso de pressão em tubulações de água em energia limpa e renovável. Por meio da realização de um estudo comparativo de viabilidade real utilizando BFT, turbogeradores e turbinas no sistema de distribuição de água de uma mineradora de minério de ferro.

2. CONCEITOS PRELIMINARES

2.1 Modelagem Hidráulica Utilizando EPANET

O EPANET é um *software* de modelagem hidráulica e qualidade da água, desenvolvido pela EPA – *Environmental Protection Agency*, que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade em redes pressurizadas de distribuição de água. A versão do programa EPANET 2.0 BRASIL, de 2009, é uma iniciativa do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), pertencente à UFPA (Rossman, 2000).

É possível estabelecer cenários de projetos, comparar com dados de medição resultando na calibração de modelos hidráulicos, análise do decaimento do cloro residual e a

avaliação de consumos. Estes são alguns dos exemplos de aplicação do programa.

As capacidades de modelagem hidráulica são inúmeras, onde se destacam como principais, segundo Rossman (2000):

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Modelagem da relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (p. ex. aspersores de irrigação, ou consumos dependentes da pressão);
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (p. ex., altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

2.2 Turbogeneradores

O turbogerador (conjunto turbina e gerador) é um equipamento compacto que consiste em uma turbina e um gerador assíncrono trifásico alojado dentro de um invólucro metálico feito de aço carbono, revestido no interior e no exterior.

Possui uma instalação em circuito hidráulico pressurizado, usando dois flanges padrão soldados às extremidades do tubo metálico. A energia elétrica gerada flui através dos cabos instalados no gerador e que passam pelo flange a montante até o painel de proteção e controle, do qual eles estão conectados à rede de distribuição elétrica (Pam, 2018).

2.3 Turbinas Hidráulicas

A energia hidráulica é principalmente convertida em energia elétrica através de turbinas e geradores. A turbina realiza a transformação da força e pressão da água em energia cinética de rotação. As turbinas hidráulicas, são máquinas motrizes que transformam a energia hidráulica em energia mecânica, resultado no torque com o qual o eixo da máquina gira.

Elas estão compostas por um rotor inserido em uma câmara que recebe e orienta o fluxo d'água. Essa câmara pode ser aberta, em forma de caixa; ou fechada, em forma de tubulações ou em uma espiral. Ao passar pelo rotor ela varia sua velocidade em magnitude e direção devido ao contato com as pás, que recebem a ação das forças exercidas, entregando potência mecânica ao eixo (Dixon *et al.*, 2010).

O rotor, que é uma das partes móveis da turbina, é constituído por um conjunto de pás, fixas ou não. O eixo do rotor é acoplado a um sistema de controle do regulador de velocidade. Este sistema de controle, por sua vez, atua no sistema de distribuição do fluxo d'água, instalado na entrada do rotor, denominado de distribuidor. O rotor recebe o fluxo, transforma a energia hidráulica disponível em energia mecânica, traduzida pelo torque no eixo. A água, após passar pelo rotor, é direcionada pelo tubo de sucção para o canal de restituição, localizado sob o piso da casa de máquinas. O torque do rotor, transmitido ao seu eixo, é utilizado para acionar o rotor do gerador elétrico. Esse, por sua vez, cria um campo magnético no interior das bobinas do estator, que transforma o torque mecânico em energia elétrica (Dixon *et al.*, 2010).

As turbinas podem ser classificadas de várias maneiras, de acordo com diferentes parâmetros. As classificações mais esclarecedoras dizem respeito à forma de atuação da água sobre o rotor e à direção do movimento da água em relação ao rotor. Como exemplo de turbinas de ação pode-se citar as Pelton e a Michell Banki sem tubo de sucção (convencional) e como exemplos de turbinas de reação a Kaplan, Francis, Hélice (Propeller) e Michell Banki com tubo de sucção. Quanto à direção do movimento da água em relação ao rotor, as turbinas podem ser classificadas como turbinas radiais, axiais e tangenciais.

2.4 Bombas Funcionando como Turbinas - BFTs

Apesar de desempenharem processos opostos, quando comparados os aspectos construtivos e hidráulicos, as bombas e turbinas hidráulicas assemelham-se. O mesmo acontece quando a comparação é feita entre máquinas elétricas motoras e geradoras. A Fig. 1 apresenta uma comparação entre uma bomba, onde é fornecida energia mecânica para que esta seja convertida em energia hidráulica (máquina geratriz), e sua operação como turbina, onde ela recebe energia hidráulica, convertendo-a em energia mecânica (máquina motriz) (Lima, 2013).

Vantagens e Desvantagens no uso de BFTs são enumeradas a seguir, em substituição às turbinas convencionais para pequenos aproveitamentos, sendo elas, segundo Lima (2013):

- Vantagens econômicas: bombas são mais baratas que turbinas, uma vez que seu mercado consumidor é muito amplo, ocorrendo, portanto, produção em massa, o que não acontece com turbinas;
- Disponibilidade: a disponibilidade de bombas e suas peças de reposição é muito maior do que de turbinas, principalmente em países em desenvolvimento;

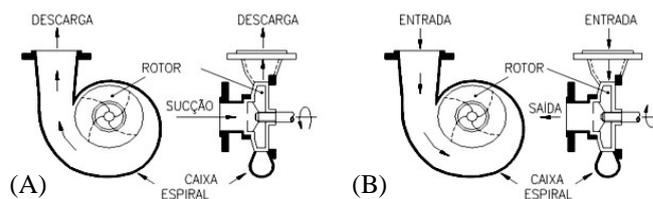


Fig.1 Bomba centrífuga funcionando como (A) bomba e (B) turbina (Lima, 2013).

- Construção: bombas são simples e robustas, não exigindo conhecimento técnico altamente qualificado para sua manutenção;
- Bombas e motores podem ser adquiridos em conjunto, formando um grupo gerador completo;
- Bombas comercialmente apresentam uma ampla faixa de tamanhos e potências, atendendo aos mais diversos tipos de aproveitamento, desde 0,3 (kW) até 300 (kW);
- O tempo de entrega de bombas é muito menor que o de turbinas;
- A instalação de grupos moto-bomba é mais simples que a de grupos geradores convencionais;
- Grupos moto-bomba, com acoplamento direto, reduzem as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

Desvantagens também são relacionadas quando do emprego de BFTs:

- Em certos casos, possuem rendimento um pouco inferior se comparado ao rendimento das turbinas convencionais;
- Não possuem sistemas de regulação de carga;
- Não possuem sistemas de controle de vazão;
- Devem operar com potência constante, não admitindo variações de carga (a não ser que se utilize um regulador de carga).

3. METODOLOGIA

O ponto de partida para a escolha do local mais favorável para estudo e simulação, foi o levantamento de todo o sistema de captação de água dos poços e encaminhamento dos principais encanamentos. Foi analisado também, o memorial descritivo de uma implementação na empresa de um tanque de 35.000 (m³), desenvolvido pelo setor de projetos de infraestrutura, barragem e industriais, este é o maior tanque de água disposto no setor de mineração.

Com base no estudo analítico do sistema citado acima, escolhido unicamente por seu desnível e suporte de grande fluxo de água, que corresponde ao trecho entre o TQ-205 e o TQ-201 da Fig. 2, sendo que, o tanque TQ-205 possui uma capacidade de 35.000 (m³) e o tanque TQ-201 possui uma capacidade de 8.000 (m³). Este trecho é utilizado para transporte de água limpa até escritórios e áreas habitadas.

A Fig. 2 demonstra o fluxograma de processo de interligação dos tanques em estudo. Além da tubulação de 32" de diâmetro (800 mm) de aço carbono helicoidal para

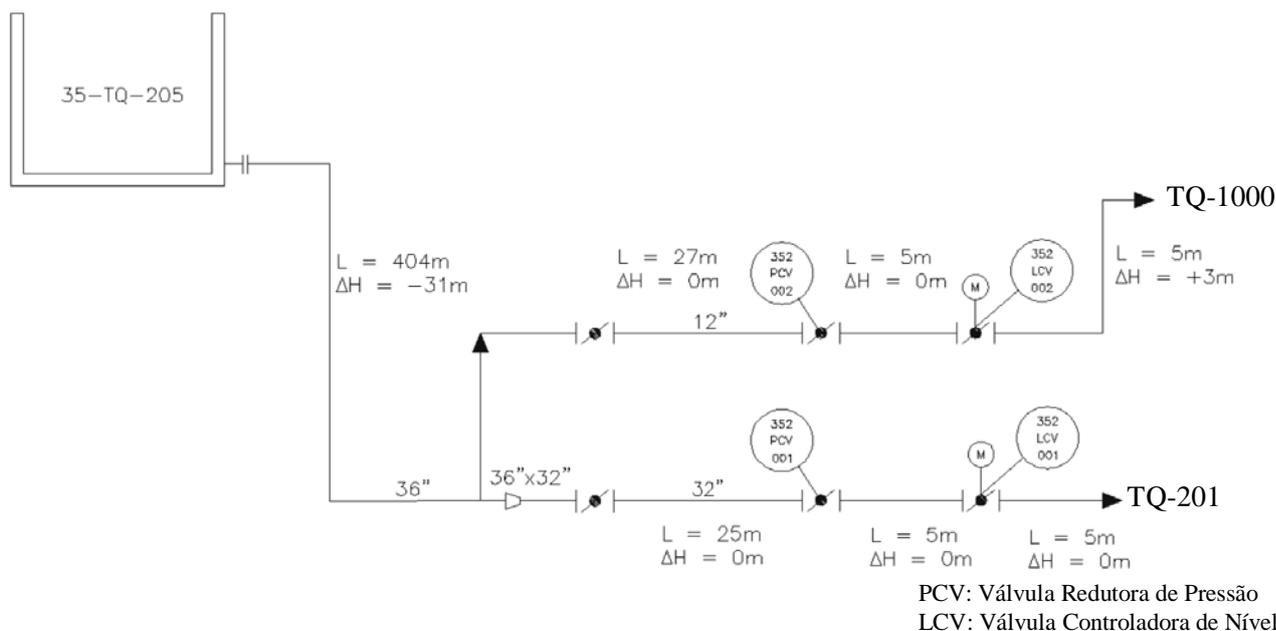


Fig. 2 Croqui do sistema entre os tanques TQ-205 e TQ-1000/TQ-201.

alimentação do TQ-201, próximo do mesmo existe uma derivação para o tanque TQ-1000 de 12" de diâmetro (300 mm). Como a derivação para o TQ-1000 é uma contingência para falhas no fornecimento de água do rebaixamento do lençol freático da Mina, esta interligação não foi considerada, pois o período de utilização do sistema seria somente em casos de emergência ou manutenção do sistema.

Foi necessário então, realizar uma modelagem hidráulica para levantamento dos parâmetros do sistema e análise dos potenciais pontos de viabilidade da instalação do sistema de geração.

Utilizou-se o *software* EPANET, que permite executar simulações do comportamento hidráulico e de qualidade de água em redes de distribuição pressurizadas e possibilita obter diversas grandezas como os valores de vazão em cada tubulação, a pressão em cada nó, altura de água em cada reservatório de nível variável e a concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo (Rossman, 2000).

A simulação foi realizada importando o desenho em AutoCAD do trajeto do sistema de tubulação escolhido, também desenvolvido pelo setor de projetos de infraestrutura da empresa, visto que, o *software* possui um módulo de importação de arquivos do AutoCAD para o EPANET, convertendo o desenho do traçado da rede de tubulações para um arquivo de dados de entrada composto por trechos e nós, mantendo intactas as coordenadas dos vértices. Adicionou-se apenas os tanques e válvulas.

As figuras 3 e 4 representam o sistema modelado, sendo que a adutora possui um comprimento de aproximadamente 400 (m).

A simulação pode ser analisada através das cores em cada nó que representam a pressão neste ponto em específico e a cada conexão de nó que mostra o valor da vazão neste trecho. Sendo que, os nós estão representados pelas cores azul escuro e azul claro, pressão entre 25 e 50 (mca) e os trechos de vermelho, da qual expressa uma vazão acima de 400 (m³/h).

A Tabela 1 mostra os dados da simulação quanto a nós e tanques, são os pontos da rede de união dos trechos, onde a água entra e sai, em que, os principais dados de entrada para os nós são: a Cota acima de determinado nível de referência, a Carga Hidráulica que representa o nível de água e a Pressão que expressa a altura piezométrica.

Já a Tabela 2 apresenta análises referentes a trechos e válvulas simuladas, que transportam água entre os vários pontos do sistema, em que, como resultado do ensaio obtém-se a Vazão, Velocidade e Perda de Carga em um determinado Comprimento do trecho.

Observa-se que a válvula VRP1, mostrada na Fig. 4, reduz a pressão em 22,04 (mca), pressão esta que pode ser utilizada em uma microgeração de energia. Sendo assim, a potência útil foi calculada usando (1) e utilizando um rendimento global hipotético de um conjunto turbina/gerador de 70%, 22,04 (mca) de pressão e uma vazão de 5527 (CMH), obtendo um potencial de geração de 232 (kW), se substituirmos a VRP1 por um conjunto de turbinas/geradores.

$$P_u = \eta_t \times Q \times H_u \times \gamma \quad (1)$$

Sendo:

- P_u : potência útil do sistema (W);
- η_t : rendimento total da planta geradora;
- Q : vazão turbinada expressa em (m³/s);

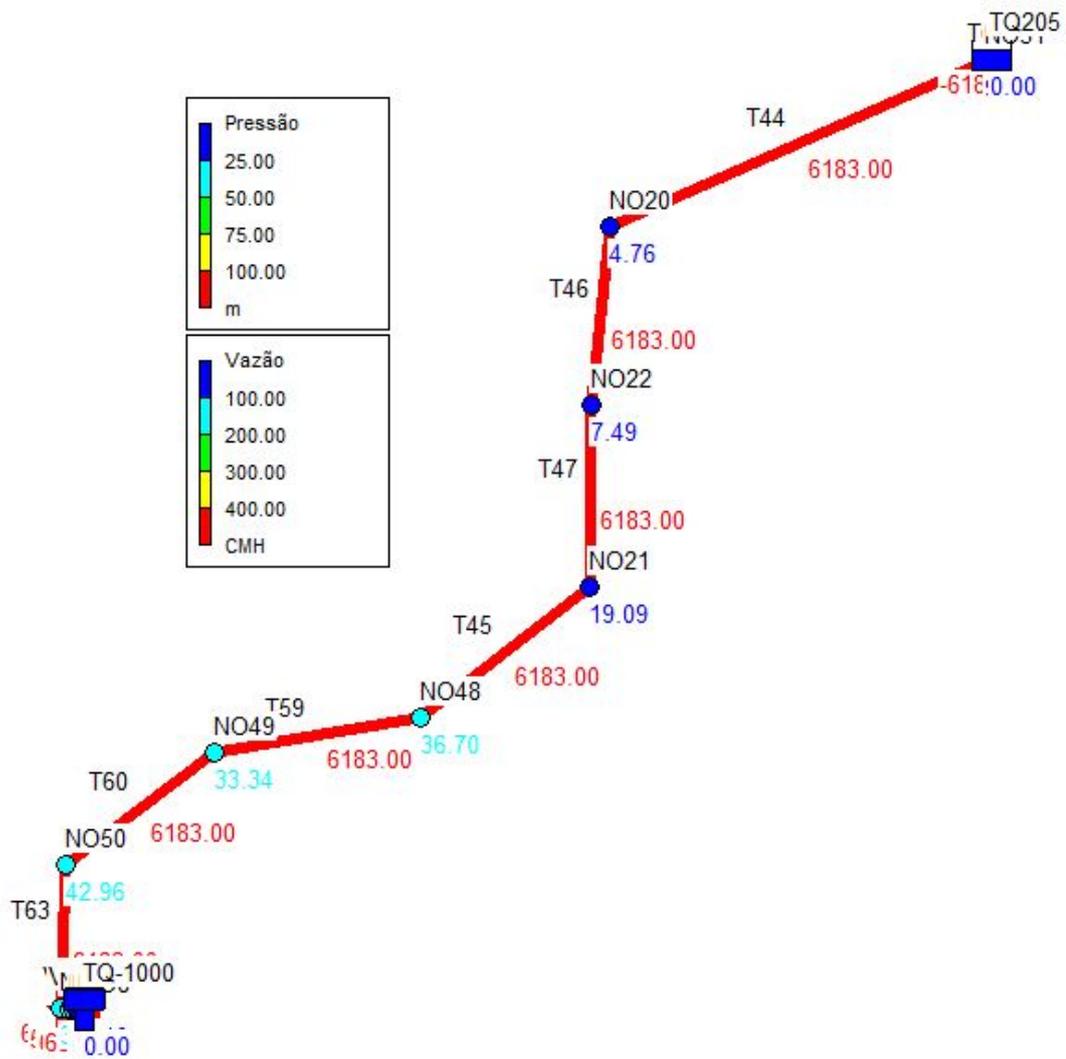


Fig. 3 Trajeto modelado dos tanques TQ-205 ao TQ-1000/TQ-201. Unidades: (CMH) = (m³/h) e m (metro) = coluna de água equivalente.

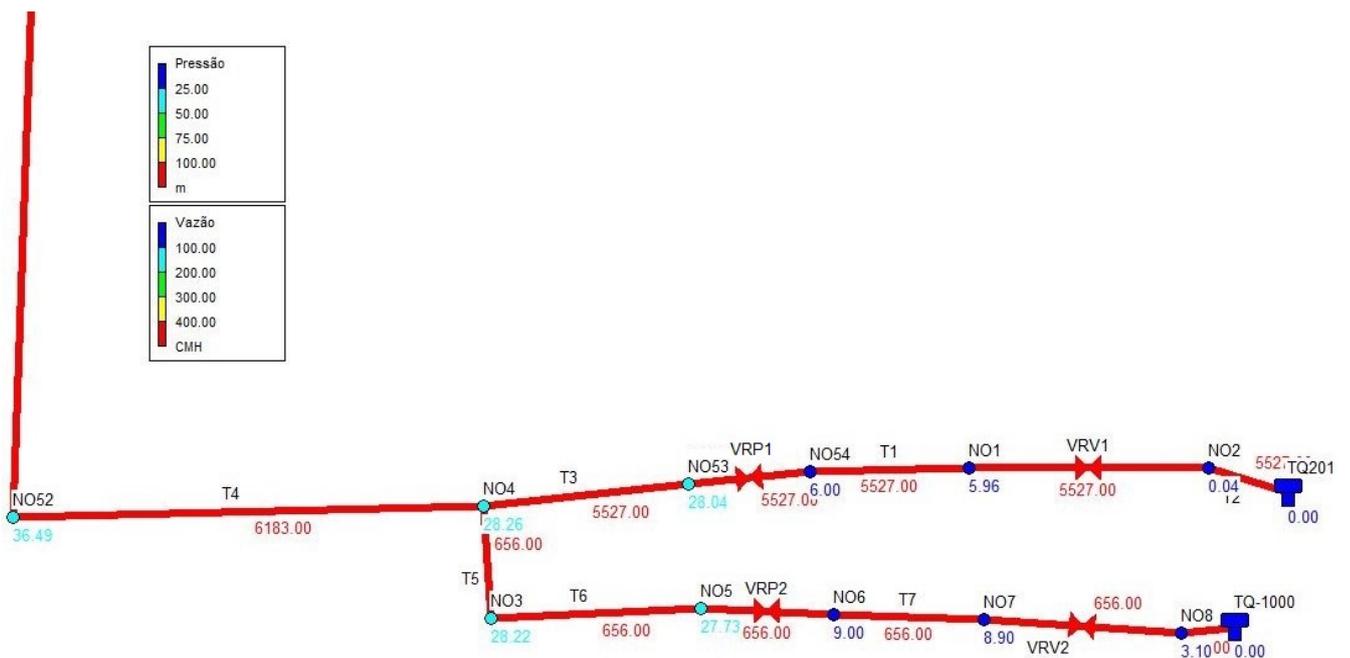


Fig. 4 Detalhamento da chegada aos tanques TQ-1000/TQ-201.

Tabela 1. Dados da simulação dos nós e tanques

Identificador do Nó	Cota (m)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (mca)
Nó NO20	1166	1170,76	4,76
Nó NO21	1151	1170,09	19,09
Nó NO22	1163	1170,49	7,49
Nó NO48	1133	1169,70	36,70
Nó NO49	1136	1169,34	33,34
Nó NO50	1126	1168,96	42,96
Nó NO51	1161	1170,99	9,99
Nó NO52	1132	1168,49	36,49
Nó NO53	1140	1168,04	28,04
Nó NO54	1140	1146,00	6,00
Nó NO4	1140	1168,26	28,26
Nó NO1	1140	1145,96	5,96
Nó NO2	1140	1140,04	0,04
Nó NO3	1140	1168,22	28,22
Nó NO5	1140	1167,73	27,73
Nó NO6	1140	1149,00	9,00
Nó NO7	1140	1148,90	8,90
Nó NO8	1140	1143,10	3,10
RNF TQ205	1171	1171,00	0,00
RNV TQ201	1140	1140,00	0,00
RNV TQ-1000	1143	1143,00	0,00

- γ : peso específico da água, igual a 9,8 (kN/m³);
- H_u : queda útil, expressa em metros ou metros de coluna d'água (queda teórica subtraindo as perdas de cargas localizadas e as perdas de carga distribuídas).

Para estes mesmos dados hidráulicos, foi dimensionado uma BFT (bomba funcionando como turbina), dois turbogeradores (um fabricante nacional e um importado) e um conjunto turbina e gerador síncrono para este local e comparou-se a geração de energia e os investimentos envolvidos em cada solução, que será apresentado, em detalhes, na seção a seguir.

4. RESULTADOS

Os dimensionamentos dos conjuntos foram realizados baseados em uma vazão de 5527 (CMH) e a uma pressão residual de 22 (mca). Foram levantados os custos de investimento em equipamentos, adequações civis e de manutenção, baseada nos recursos disponíveis pela empresa e avaliações de colaboradores experientes nesses tipos de obras. Alguns dados foram obtidos a partir das propostas comerciais, sendo eles: Rendimento, Dimensionamento do Conjunto, Gerador, Velocidade da Turbina, Tensão, Automação/Controle e Valor do Conjunto. Sendo que, dentro desse valor de cada conjunto, está incluso a conexão com a rede, portanto, não foram necessários ajustamentos para essa finalidade. Todas estas informações estão resumidas na Tabela 3 e detalhadas conforme se segue.

Considerando as obras a serem realizadas, para os turbogeradores, que são equipamentos compactos cuja instalação requer poucas intervenções, foi considerado o valor de 3% do investimento inicial para obras. Para a BFT,

Tabela 2. Dados da simulação dos trechos e válvulas

Identificador do Trecho	Comprimento (m)	Vazão (CMH)	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)	Estado
Tubulação T46	45	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T47	68	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T59	60	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T44	40	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T62	1	-6183,0	2,70	5,88	Open
Tubulação T63	45	6183,0	3,42	10,47	Open
Tubulação T45	67	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T60	64	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T3	25	5527,0	3,05	8,51	Open
Tubulação T4	40	6183,0	2,70	5,90	Open
Tubulação T1	5	5527,0	3,05	8,51	Open
Tubulação T2	5	5527,0	3,05	8,51	Open
Tubulação T5	2	656,0	2,58	19,53	Open
Tubulação T6	25	656,0	2,58	19,53	Open
Tubulação T7	5	656,0	2,58	19,53	Open
Tubulação T8	5	656,0	2,58	19,53	Open
Válvula VRP1	#N/A	5527,0	28,70	22,04	Active
Válvula VRV1	#N/A	5527,0	3,05	5,91	Active
Válvula VRP2	#N/A	656,0	2,58	18,73	Active
Válvula VRV2	#N/A	656,0	2,58	5,80	Active

pelo fato de que a bomba é desacoplada da máquina assíncrona é necessário obras maiores para a adequação, estimou-se 15% do investimento inicial. Já para turbina, trata-se de um equipamento grandioso, com sistemas de regulação mecânicos e desacoplados que precisam de uma estrutura civil fechada e coberta para instalação da turbina, máquina síncrona e equipamentos elétricos, ponderou-se de 30% da aplicação.

Leva-se em conta também valores anuais de recursos para manutenção de 1% para turbogeradores e 2% para BFT e Turbina. Os valores são menores para o primeiro pois, tanto a turbina quanto o gerador encontram-se acoplados dentro da tubulação, o que torna a manutenção menos frequente que para os demais equipamentos.

A energia gerada estará conectada a uma rede interna de 13,8 (kV), que se encontra muito próxima ao local de instalação da geração distribuída, cerca de 30 (m). A energia produzida é para consumo interno, tendo em vista a alta utilização de energia elétrica pela mineradora.

Baseado nos dados da Tabela 3, foi realizado um estudo de viabilidade econômica para instalação das 4 opções. Levou-se em conta premissas básicas para analisar a efetivação de cada conjunto: horizonte e vida útil de 10 anos, depreciação do equipamento no período de 10 anos, taxa de atratividade mínima de 11,96%, valor do (kWh) a R\$ 0,35 e IPCA de 4% ao ano.

A análise financeira consiste que o Valor Presente Líquido (VPL) deva ser positivo, a Taxa Interna de Retorno (TIR), por sua vez, maior que a Taxa de Atratividade Mínima (WACC) e o Retorno do Investimento Descontado (*Payback*)

Tabela 3. Comparativo dos conjuntos

Conjunto	Rendimento (%)	Disponibilidade/mês (h)	Dimensionamento do Conjunto	Dimensionamento da Saída do Conjunto (kW)	Potência Útil (kW)	Gerador	Velocidade Turbina (rpm)
Turbogerador Nacional	70	672	230 (kW)	230,00	231,24	Assínc.	1800
Turbogerador Internacional	67		111 (2×) (kW)	222,00	111 (2×)	Assínc.	1800
Turbina	72		282 (kVA)	225,00	237,85	Sínc.	238
BFT	78		276 (kW)	260,00	257,67	Assínc.	600

Conjunto	Tensão (V)	Automação / Controle	Conjunto (R\$)	Trafo e Painel de Alta (R\$)	Obras (R\$)	Total (R\$)	R\$/kW
Turbogerador Nacional	440	CLP e Inversor Regenerativo	2.100.000,00	130.000,00	66.900,00	2.296.900,00	9.986,52
Turbogerador Internacional		CLP e Sistema Regulador	2.107.692,00	130.000,00	67.130,76	2.304.822,76	10.382,08
Turbina		CLP, Regulador de Velocidade, Tensão e Sincronismo da SCEPP	800.000,00	130.000,00	279.000,00	1.209.000,00	5.373,33
BFT		CLP e Inversor Regenerativo	1.400.000,00	130.000,00	229.500,00	1.759.500,00	6.767,31

Tabela 4. Comparativo dos resultados do estudo de viabilidade dos conjuntos

Conjunto	VPL (R\$)	Payback	TIR (%)
Turbogerador Nacional	1.474.000,00	4 anos e 4 meses	20
Turbogerador Internacional	1.336.000,00	4 anos e 2 meses	18
Turbina	2.385.000,00	2 anos e 9 meses	77
BFT	2.395.000,00	2 anos e 2 meses	46

compatível com a vida útil e também com a estratégia da empresa (White *et al.*, 2012).

A Tabela 4 dispõe os valores obtidos da viabilidade econômica realizada para cada conjunto levando em consideração as premissas citadas.

Pode-se observar que o VPL, o *Payback* e a TIR dos dois turbogeradores são próximos e viáveis. Já o conjunto Turbina apresentou preferíveis indicadores de viabilidade se comparado aos sistemas de turbogeradores, mas principalmente a melhor Taxa Mínima de Atratividade, em que, um ponto relevante na comparação da turbina com os turbogeradores é a influência destas soluções no sistema de abastecimento de água, que é a atividade fim das tubulações e reservatórios. E por fim, ao analisar a viabilidade da BFT deparou-se com os melhores VPL e *Payback* dentre as opções estudadas.

5. CONCLUSÕES

O sistema de abastecimento de água proporciona vários pontos potenciais para utilização desta tecnologia, sendo que

foi explorado neste trabalho principalmente a instalação de BFTs, turbinas e turbogeradores para aproveitar a pressão excedente disponível em adutoras.

Para o sistema de distribuição de água de uma mineradora, através da modelagem do sistema todas as opções: BFT, turbogeradores e turbina, foram viáveis financeiramente. A alternativa utilizando-se BFT demonstrou a melhor análise financeira, seguida pela turbina e, posteriormente, os turbogeradores.

Analisando tecnicamente, existem algumas particularidades que precisam ser observadas, como as possíveis variações nos parâmetros hídricos. O fato de a BFT não ter um controle de vazão de entrada e pressão de saída pesa negativamente na escolha do sistema.

Para a turbina, um ponto positivo é seu controle com difusor da vazão, entretanto a área e estrutura necessária para sua instalação é bem maior do que para a BFT e turbogeradores, mas o local previsto para a disposição do conjunto possui um espaço restrito, com vários tanques, pórticos de saídas de redes aéreas e a Subestação Principal da Mineradora, se tornando um ponto negativo para esta solução. Outro ponto desfavorável da turbina é a necessidade de mão de obra especializada e treinada para manutenção da turbina e motor síncrono, o que não ocorre nos outros casos, na qual as equipes de manutenção já estão familiarizadas com a manutenção em máquinas assíncronas e bombas.

Portanto, tecnicamente os turbogeradores são as melhores opções, pois são compactos, possuem baixa manutenção, exigem poucas adequações, principalmente nas tubulações e possuem confiabilidade e controles para não influenciarem negativamente no sistema de abastecimento de água. No caso

do Turbogeração Nacional, o suporte técnico no Brasil e, particularmente, em Minas Gerais é um grande diferencial.

Foi constatado a aplicabilidade e viabilidade das BFTs na geração de energia em tubulações, principalmente na microgeração e verificado um avanço tecnológico com a aplicação dos turbogeradores, que utilizam da tecnologia de controle das turbinas, mas em menor escala. O sistema de abastecimento de água das cidades e de empresas do setor industrial possuem um potencial de geração de energia elétrica distribuída significativo e, que se bem explorado, auxiliará no aumento da eficiência energética.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2015). *Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2020.
- ANEEL (2016). *Cadernos Temáticos ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída*. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/16505063/2016_CadernosTematicosANEELMicro2ed.pdf/01be3063-b1fe-a27f-cdc0-a9d81369391d>. Acesso em: 14 maio 2020.
- Casini, M. (2015). Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale. *Int. J. Smart Grid and Clean Energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 316-327.
- Dixon, S.L. and Hall, C.A. (2010). *Fluid Mechanics and thermodynamics of turbomachinery*, 6th ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Lima, G.M. (2013). *Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água*, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, MG.
- Pam (2018). *Turbogerador – Especificação Técnica*. Disponível em: <<https://www.sgpam.com.br/sites/default/files/uploaded/downloads/et-turbogerador.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2020.
- Ramos, H. M., Mello, M., and De, P.K. (2010). Clean power in water supply systems as a sustainable solution: from planning to practical implementation. *Water Sci. Technol.*, Vol. 10, No. 1, pp. 39-49.
- Rossman, L. (2000). *EPA, EPANET 2 User Manual*. Office of Water. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/R-00/057.
- Sosnoski, A.S.K.B. (2015). *Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água*. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP.
- Viana, A.N.C., Rezek, A.J.J., Medeiros, D.M. (2004). *A Utilização de Geradores de Indução Acionados por BFTs na Geração de Energia Elétrica*. ADRENER GD, Campinas, SP.
- White, J.A., Case, K.E., and Pratt, D.B. (2012). *Principles of Engineering Economic Analysis*, 6th ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.