

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MICROGERAÇÃO ENERGÉTICA EM REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, UTILIZANDO BFT'S

*João Marcos Carvalho<sup>1\*</sup> & <sup>2</sup>Henrique Degraf<sup>3</sup> & <sup>3</sup>Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes*

**Resumo** – A distribuição de pressões em um Sistema de Distribuição de Água (SDA) é um desafio muito interessante considerando as influências da topologia e da distribuição temporal da variação de consumo. Alguns mecanismos como válvulas redutoras de pressão (VRPs) tem a função de atenuar os impactos físicos desses efeitos com perdas de energia. No entanto a energia dissipada não é reaproveitada e as válvulas tem somente a função de regularizar as pressões na tubulação e por consequência atenuar os efeitos de vazamentos. Neste contexto se insere a utilização de bombas funcionando como turbinas (BFTs) como alternativa energética, em sistemas com zonas de pressão muito variáveis. As BFTs podem tanto ter a função de uma VRP, mas reaproveitando a energia dissipada, ou função de uma bomba, quando o sistema precisar de mais energia em sua rede. A adoção de BFTs em redes de distribuição de água pode vir a ser uma boa opção de controle do sistema e de reaproveitamento energético para sistemas com elevadas variações de relevo e consumo. Nesta pesquisa ênfase é dada na consolidação de método de avaliação do potencial de microgeração energética, utilizando modelo matemático EPANET, com o objetivo de estabelecer elementos para uma análise adequada em SDA's.

**Palavras-Chave** – Microgeração, Bombas Funcionando como Turbinas, Redes de distribuição

### ENERGY MICROGENERATION IN WATER SUPPLY NETWORKS, USING PUMPS OPERATING AS TURBINES

**Abstract** – The distribution of pressures in a water system distribution is a conceptual challenge very interesting considering the influences of the topology and the variation of water demand. Some mechanisms like pressure reduction pressure valves (VRPs) attenuate the physical impacts with head losses. However, this dissipated energy is lost because the valves have the functions regularize the pressure in the pipes and by consequence to diminish the effect of leakages. In this context pumps as turbines (PATs) become an alternative energy source, in systems with highly variable pressure zones. The PATs have the function of a VRP, but reusing the dissipated energy, or the function of a pump, when the system needs more power in their net. The option for PATs in water distribution networks can be a good option of system control and energy reuse for nets with highly variable demand and relief. Emphasis is given to the consolidation of a method for evaluate the microgeneration potential, using the mathematical model EPANET, with the objective of establish elements for a proper analyses in water supply network systems.

**Keywords** – Microgeneration, Pumps as Turbines, Distribution Networks.

### Introdução

Um sistema de abastecimento de água (SAA) é uma solução de Engenharia que consiste de elementos como tubulações, bombas, reservatórios e elementos de controle como válvulas para atender requisitos de demanda de água, considerando parâmetros mínimos de serviço, como pressão e qualidade. O desafio de entender a eficiência global do sistema inclui a integração de análise

<sup>1</sup> Afiliação: Bolsista IC PIBIC/CNPq UFPR, joao.huf.carvalho@hotmail.com

<sup>2</sup> Afiliação: Aluno IC voluntário, degraf.henrique@gmail.com

<sup>3</sup> Afiliação: Professor Associado UFPR, cris.dhs@ufpr.br

hidráulica, topologia e a estratégia de zoneamento de pressões mínimas e máximas considerando as flutuações de demanda. A estratégia integrada do ponto de vista da energia dissipada inclui: as variações na topografia que geram um excesso de energia nas regiões baixas do sistema, pois estabelecem-se pressões significativas; sensibilidade às variações hidráulicas incluindo vazamentos e as variações de demanda nas horas e dias distintos, conforme indicados na Figura 1. Neste contexto, a energia dissipada está diretamente ligada a energia da pressão a mais no sistema e suas implicações hidráulicas e de demanda.

Isto posto, esta pesquisa estabelece um método para analisar o potencial de microgeração energética em redes de abastecimento de água utilizando bomba funcionando como turbina (BFT) como parte da estratégia de controle de pressões, e recuperar parte da energia em excesso presente no sistema e torná-lo globalmente mais eficiente. Resultados foram obtidos a partir de 2 estudos de caso representando sistemas de abastecimento de água hipotéticos, estratégia está muito utilizada em artigos na literatura.

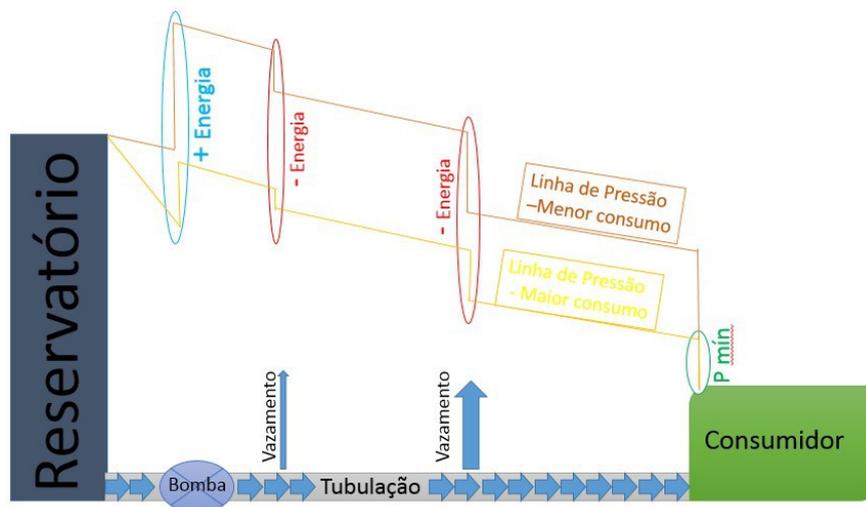


Figura 1 - Imagem conceitual das variações de energia em uma rede de abastecimento de água.

## Microgeração Energética e aplicação em SAA

A microgeração energética consiste de pequenos sistemas para complementar o sistema energético global de uma região. Esse tipo de geração é bastante explorada em países onde as fontes energéticas usadas estão no seu limite de capacidade ou com altos valores tarifários, Ricardo (2007).

Lima (2013) estabelece que a microgeração no Brasil ainda é pouco praticada. Cabe destacar que apenas em 2012 a ANEEL estabeleceu condições de interação dos micro e mini geradores com o sistema de distribuição de energia elétrica, com a oportunidade para integrar placas fotovoltaicas e turbinas eólicas. As principais vantagens da microgeração, em especial a hidrelétrica, são, segundo Ricardo (2007): Sistemas pouco influenciados pela inflação, vida útil longa, baixos impactos sociais e ambientais, não necessidade de longas linhas de transmissão e flexibilidade do sistema.

Neste contexto, existem poucos estudos com ênfase em explorar o potencial de BFTs em SAA. BFTs são bombas hidráulicas adaptadas para funcionar como bombas ou turbinas. A vantagem de se utilizar essas máquinas segundo Williams (1995) e Lima (2013) são: custo reduzido do equipamento, maior disponibilidade de modelos de bombas no mercado, disponibilidade de peças de reposição e instalação simples.

A utilização de BFTs se torna uma alternativa interessante, segundo Carravetta *et al.* (2013), para a substituição de válvula redutoras de pressão ou outros dispositivos com a mesma função, pois potencialmente ao terem a mesma função protetora podem aproveitar a energia dissipada do

sistema. Zhang e Karne (2003) argumentam que esse efeito se intensifica quando considerado as variações de demanda de uma cidade, pois deste modo a cidade passa a ter uma função de *pumped storage*, de modo que retirando energia em excesso do sistema em períodos que ela não é necessária, o sistema pode armazená-la para usar a posteriori; criando desse modo um procedimento mais racionalizado, flexível e eficiente.

As oportunidades de exploração de recursos com menor capacidade energética vêm crescendo potencialmente como o uso de micro recursos hidráulicos (abaixo de 100 kW). Nesse cenário, as BFT's (bombas funcionando como turbinas) vêm ganhando uma dimensão maior de estudos e aplicações, devido ao seu baixo custo de investimento e manutenção. Um desafio é o de estabelecer curvas características consistentes com o foco em recuperação energética Buono *et al.* (2015). Características das BFTs são obtidas ou através de simulações em laboratório ou por meio de modelos matemáticos conforme analisado por Barbarelli (2016)

As BFTs ligadas no modo de turbina tem suas curvas de rendimento muito acentuada e rendimento sempre menor ou igual a de seu modo bomba, por essa razão Ricardo (2007), Silva e Hendrick (2016), Barbarelli (2016) e Jain *et al.* (2015) recomendam a utilização de métodos que mantenham a utilização da BFT na sua faixa ótima, como uso em paralelo de vários modelos de máquinas de diferentes tamanhos ou adição de válvulas que regularizem a vazão que passará por ela. A Figura 2 exemplifica as curvas dos dois modos de funcionamento da máquina

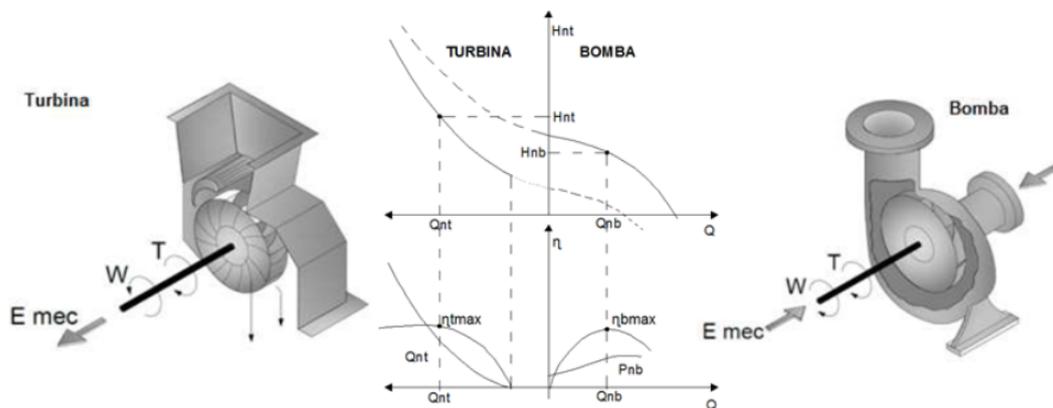


Figura 2 - Comparação entre a operação de uma bomba com sua operação como turbina. Fonte: Lima (2013)

## Materiais e Método

Para a definição de método para a avaliação do potencial microgeração em redes de distribuição de água utilizou-se o modelo EPANET 2.0 tendo como base o algoritmo desenvolvido por Todini e Pilati (1987) para a modelagem de sistemas de distribuição de água.

A análise dos dados seguiu o método aplicado por Cabrera *et al.* (2014), que a partir dos dados de entrada de altura manométrica, demanda e cota de cada um dos nós, obtém-se coeficientes que indicam a porcentagem de cada tipo de energia presente no sistema e os compara com os dados obtidos de um mesmo modelo, porém ideal. A rotina de cálculo se encontra nas equações (1), (2) e (3). A Figura 3 destaca o modelo de Energia a ser considerado no método proposto, considerando a dinâmica potencial de variação da linha piezométrica entre os máximos e mínimas faixas de pressão admissível no sistema.

$$E_{Mínima} = Q * \Delta t * \gamma * \left[ \frac{P_0}{\gamma} + (H_n - H_0) \right] \quad (1)$$

$$E_{Excesso} = Q * \Delta t * \gamma * \left\{ \frac{P_n}{\gamma} - \left[ \frac{P_0}{\gamma} + (H_n - H_0) \right] \right\} \quad (2)$$

$$E_{Total} = E_{Excesso} + E_{Mínima} \quad (3)$$

Onde:  $Q$  = Vazão no nó,  $m^3/s$ ;  $\Delta t$  = Intervalo de tempo,  $s$ ;  $\gamma$  = Peso específico da água,  $N/m^3$ ;  $P_n$  = Pressão no nó  $n$ , m.c.a.;  $P_0$  = Pressão mínima adotada, m.c.a.;  $H_n$  = Cota do nó  $n$ ,  $m$ ;  $H_0$  = Cota do nó mais baixo do sistema,  $m$ .



Figura 3 - Energias presentes em um sistema ideal e real, respectivamente. Figura adaptada de Cabrera *et al.* (2014).

A avaliação do percentual de cada uma das energias em relação a  $E_{Total}$  dos respectivos sistemas - ideal, real e real com BFT – indica quão eficiente é a utilização da BFT, com uma forma de estabelecer um referencial relativamente ao um modelo sem perdas de energia. Para o cálculo dos valores de energias estabelecidas pelas equações (1), (2) e (3) de cada cenário, foi desenvolvido um programa em linguagem VBA, a partir de arquivo de saída do EPANET.

### Modelo 1 - SAA Idealizado e Simplificado

O Modelo 1, é um modelo simplificado com apenas um reservatório, dois nós e um único tubo ligando todos os componentes, com o intuito de observar a energia em excesso presente devido as variações de nível de reservatório, como indicado na Figura 4. Foram simulados 25 cenários, sendo eles um arranjo simples de 3 parâmetros – vazão (150 l/s, 300 l/s, 500 l/s, 1000 l/s), diâmetro da tubulação (600 – 2.000 mm) e desnível entre o ponto de consumo e o reservatório (50 e 75 m).

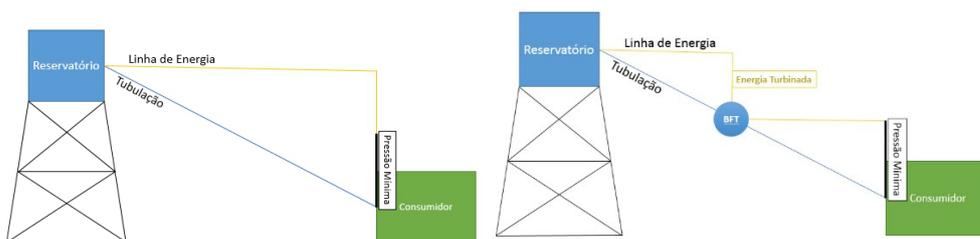


Figura 4 - Linha de energia do Modelo 1 com e sem reaproveitamento energético, respectivamente.

Com os valores obtidos calculou-se a energia em excesso e total no sistema para o último nó, essa energia foi convertida para valores em KWH e comparada com todas as situações testadas.

### Modelo 2 - SAA Hipotético

O Modelo 2 é apresentado por Colombo e Karney (2002) e destaca uma rede hipotética com vazamento nos nós 5, 8, 10 e 11. Foi introduzida uma válvula genérica simulando uma BFT em uma posição escolhida por tentativas de modo que o equipamento influenciasse as regiões com maiores pressões da rede, conforme indicado nas figuras 5 e 6. Os valores obtidos foram comparados com

suas respectivas situações sem BFT e sintetizadas na Tabela 1. Cada um dos cenários recebeu o nome de V “n”, onde n é o número do modelo testado.

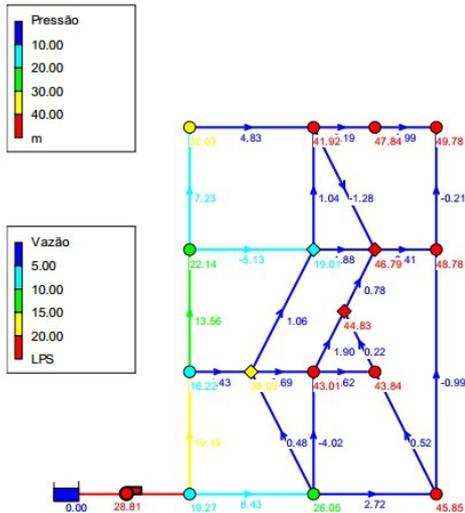


Figura 5 - Pressões e vazões no Modelo 2.

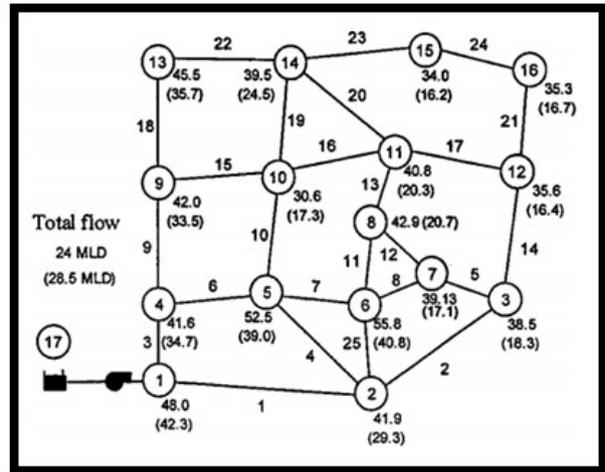
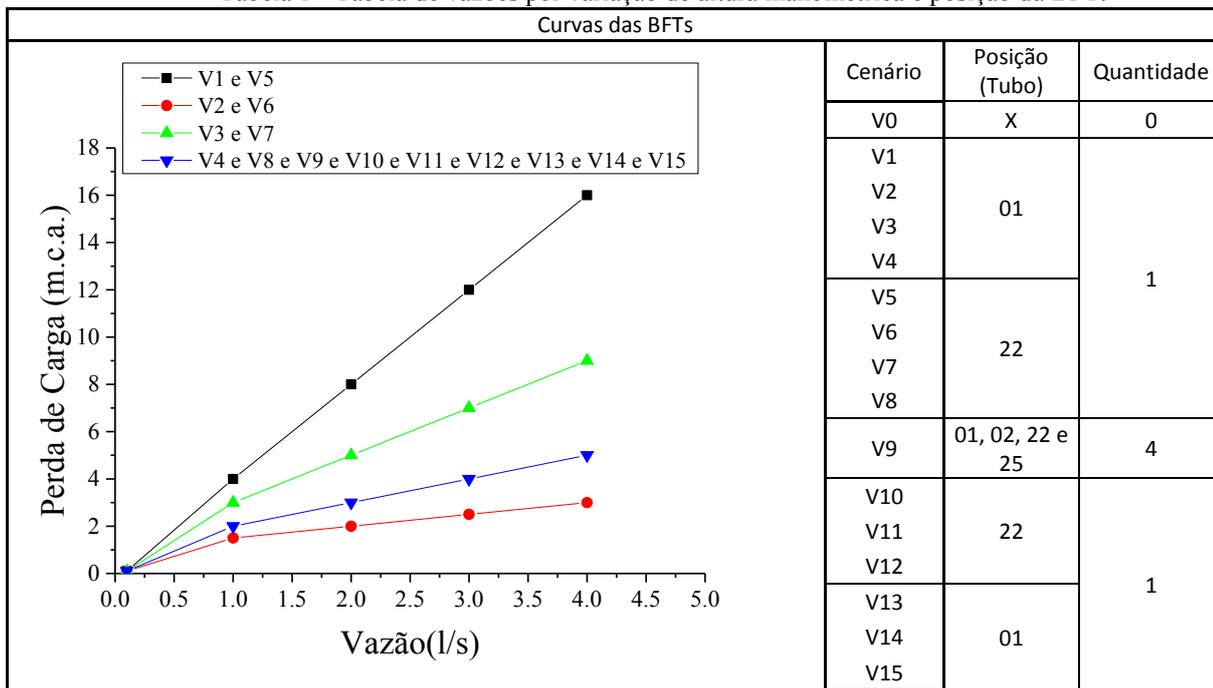


Figura 6 – Rede de distribuição de água utilizado para o modelo 2. Fonte : Colombo e Karney (2002).

Tabela 1 - Tabela de vazões por variação de altura manométrica e posição da BFT.



## Resultados

### Modelo 1

Os resultados da aplicação do método proposto está apresentado na Figura 7, a seguir para diâmetro de 2000mm e Nível de reservatório na cota 75 m. Destaca-se o potencial de geração microenergética, para os cenários estudados variando entre 165.5 e 33.1 KW. Considerando o ponto de avaliação energética, na metade do comprimento da tubulação, as porcentagens de energia, para simulação estendida e 24 horas, indica que relação de eficiência é constante em todos os

cenários realizados. A Tabela 2 mostra os valores de potência obtidos da rede de 2000 mm com 500 l/s e o percentual de cada uma de suas respectivas energias. A Figura 7 mostra a influência da vazão do sistema considerando um diâmetro de 2000 mm e diferença de altura entre o reservatório e o nó final de 75 m. Cabe destacar que a energia em excesso é responsável por 40% da energia total do sistema quando o nível do reservatório é de 50 m; para o cenário com reservatório na cota 75 m a energia em excesso passa ser 60% indicando a importância da energia total do sistema na avaliação energética e pouca influência do efeito de variação de demanda nos nós. Por conseguinte, esses resultados mostram o impacto da distribuição de pressões nos excessos de energia dissipada para geração microenergética.

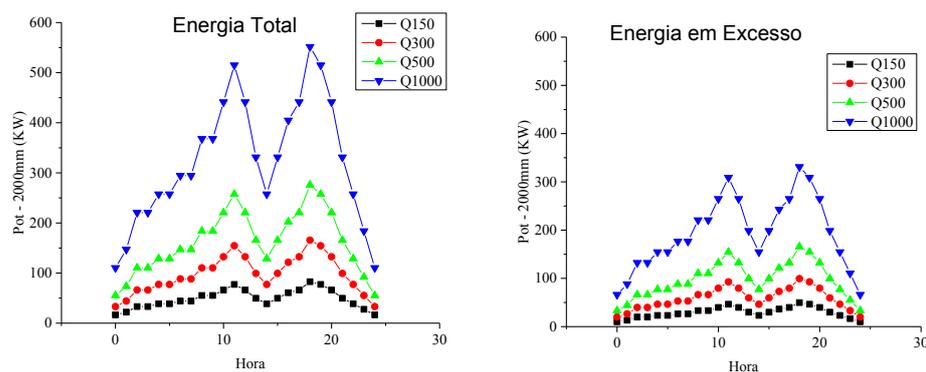


Figura 7 - Potências Totais e Excesso no sistema de modelo 1 com diâmetro de 2000mm e Nível do reservatório de 75m

Tabela 2 - Potência (kw) do modelo 1 com vazão base de 500 l/s e tubulação de 2000 mm de diâmetro.

Hora	Coeficiente de Demanda (%)	Ettotal (Kws)		E <sub>excesso</sub> ÷ Ettotal (%)	Ettotal (Kws)		E <sub>excesso</sub> ÷ Ettotal (%)
		C.R. - 50m	E <sub>excesso</sub> (Kws)		C.R. 75m	E <sub>excesso</sub> (Kws)	
0	30	36.8	14.7	40	55.2	33.1	60
1	40	49.1	19.6		73.6	44.1	
2	60	73.6	29.4		110.4	66.2	
3	60	73.6	29.4		110.4	66.2	
4	70	85.8	34.3		128.8	77.3	
5	70	85.8	34.3		128.8	77.3	
6	80	98.1	39.2		147.2	88.3	
7	80	98.1	39.2		147.2	88.3	
8	100	122.6	49.1		183.9	110.4	
9	100	122.6	49.1		183.9	110.4	
10	120	147.2	58.9		220.7	132.4	
11	140	171.7	68.7		257.5	154.5	
12	120	147.2	58.9		220.7	132.4	
13	90	110.4	44.1		165.5	99.3	
14	70	85.8	34.3		128.8	77.3	
15	90	110.4	44.1		165.5	99.3	
16	110	134.9	54.0		202.3	121.4	
17	120	147.2	58.9		220.7	132.4	
18	150	183.9	73.6		275.9	165.5	
19	140	171.7	68.7		257.5	154.5	
20	120	147.2	58.9		220.7	132.4	
21	90	110.4	44.1		165.5	99.3	
22	70	85.8	34.3		128.8	77.3	
23	50	61.3	24.5		92.0	55.2	
24	30	36.8	14.7	55.2	33.1		

## Modelo 2

Já para o modelo 2, a BFT é um elemento adicional no sistema, com impacto sobre sua dinâmica de pressões e vazões. Como destacado nos cenários de número 1 a 8, pela Tabela 3, a mudança na dinâmica hidráulica do sistema é relevante em função da reorientação de vazões por causa da inserção de uma BFT, fazendo com que sua atuação no sistema seja mínima e perdendo-se potencial de geração. Nos cenários 9 a 15, a ação de mudança da topologia da rede, reflete uma melhor dinâmica hidráulica, com vazões mais significativas; Nestas simulações, avaliou-se ou o aumento do número de BFTs na rede ou o fechamento de algumas tubulações.

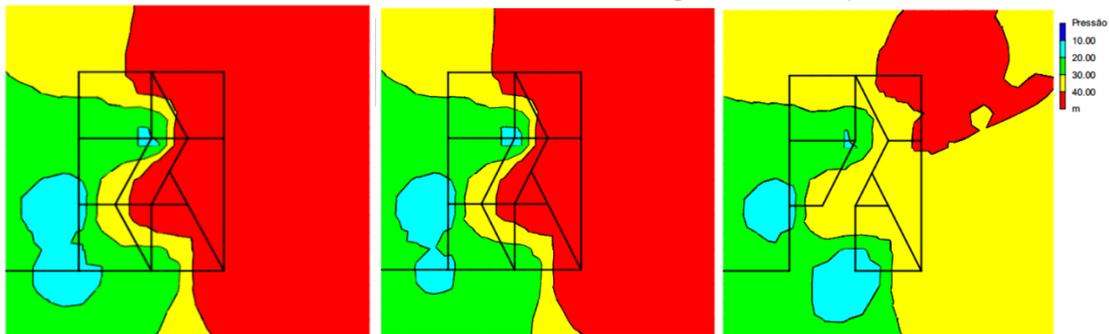
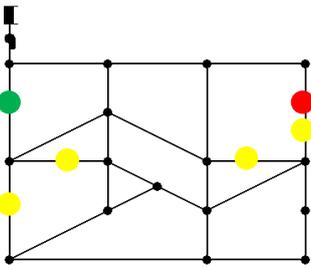
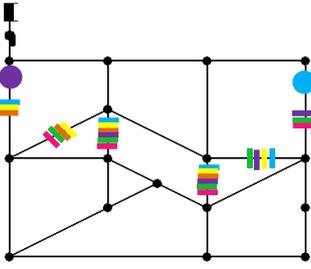


Figura 8 - Mapa de Isolinhas do Modelo 2 - cenários 0, 3 e 12, respectivamente

Tabela 3 - Tabela de vazões, variação de altura manométrica e potência gerada na BFT e comparação do seu efeito em relação as vazamentos da tubulação.

Cenário	BFT				Potência (Watts)		Posição da BFT (●) E Tubos Fechados (—)	
	H(m.c.a.)	Q(L/S)	Posição	Tubos Fechados	Com Vazamentos	Sem Vazamentos		
Rede Original	0	X	X	X	X	X		
	1	0.92	0.29			2.62		1.36
	2	0.89	0.61	●		5.33		2.57
	3	0.91	0.35		X	3.12		1.58
	4	0.90	0.48			4.24		2.03
	5	0.75	0.25			1.84		1.06
	6	0.71	0.49	●		3.41		1.85
	7	0.75	0.30		X	2.21		1.22
	8	0.73	0.40			2.86		1.56
9	1.97, 1.72, 1.53 e 2.06	0.99, 0.87, 0.78 e 1.07	●	X	264.96	141.94		
Rede Adaptada	10	6.24	5.24		—	320.76	195.81	
	11	16.76	15.75	●	—	2589.55	1970.07	
	12	6.72	5.72		—	377.08	235.01	
	13	6.08	5.09		—	303.59	181.10	
	14	<u>16.82</u>	<u>15.82</u>	●	—	<u>2610.37</u>	<u>1970.07</u>	
	15	6.33	5.33		—	330.98	202.43	

De forma interessante, através da análise da distribuição de pressões dos modelos dos modelos 0, 3 e 12, destacado na Figura 8, e com os valores presentes na Tabela 3, pode-se observar o efeito citado anteriormente. Os modelos de geração de energia com e sem vazamentos podem ser analisados também na Tabela 3, sendo que o efeito dos vazamentos é benéfico para a BFT, pois ela

age de modo a retirar a energia destinada ao vazamento e a usa para fins de geração. Destaque-se no cenário 14, a geração de até 2600 W na dinâmica hidráulica considerada.

## Conclusão

O Método de análise hidráulica aqui desenvolvido permite avaliar o impacto de BFTs como alternativa para microgeração em redes de distribuição de água com dinâmica de zonas de pressão variadas e considerando variações de demanda, pois se mostram eficazes na reaproveitamento energético da rede. Neste contexto, sua eficácia está diretamente associada a simplificação da topologia da rede onde há uniformidade hidráulica. Estudos de avaliação operacional são necessários, considerando a pouca disponibilidade de artigos na literatura.

## Referências

- BARBARELLI, S.; AMELIO, M.; FLORIO, G. (2016) Predictive model estimating the performances of centrifugal pumps used as turbines. *Energy*, v. 107, p. 103-121.
- BUONO, D.; FROSINA, E.; MAZZONE, A.; CESARO, U.; SENATORE, A. (2015). Study of a pump as turbine for a hydraulic urban network using a tridimensional CFD modeling methodology. *Energy Procedia*, v. 82, p. 201-208.
- CABRERA, E.; GÓMEZ, E.; CABRERA JR, E.; SORIANO, J.; ESPERT, V. (2014). Energy assessment of pressurized water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 141, p. 04014095.
- CARRAVETTA, A.; GIUDICE, G. D.; FECAROTTA, O.; RAMOS, H. (2013). Pump as Turbine (PAT) Design in Water Distribution Network by System Effectiveness. *Water*, v. 5, p. 1211-1225.
- COLOMBO, A. F.; KARNEY, B. W. (2002). Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 128, p. 441-450.
- JAIN, S. V.; SWARNKAR, A.; MOTWANI, K. H.; PATEL, R. N. (2015). Effects of impeller diameter and rotational speed on performance of pump running in turbine mode. *Energy Conversion and Management*, v. 89, p. 808-824.
- LIMA, G. M. (2013). Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, UNIFEI. Itajubá, MG, Brasil. [S.l.].
- RICARDO, M. (2007). Estudo de grupos moto-bomba operando como grupos geradores em microcentrais hidrelétricas. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, UNIFEI. Itajubá, MG, Brasil. [S.l.].
- SILVA, G. D. O. E.; HENDRICK, P. (2016). Pumped hydro energy storage in buildings. *Applied Energy*, v. 179, p. 1242-1250.
- TODINI, E.; PILATI, S. (1987). A gradient method for the analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK. [S.l.]: [s.n.].
- WILLIAMS, A. (2005) Pumps as turbines: a user's guide. [S.l.]: Intermediate Technology.
- ZHANG, Q.; KARNEY, B. (2003). Pipe Systems With Micro-Turbines: Water Hammer Considerations. *ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference*. [S.l.]: ASME International. p. 2865-2870.