



## **MODELAGEM HIDRÁULICA UTILIZANDO SOFTWARE EPANET PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ADUÇÃO DO MUNICÍPIO DE SANTA TEREZINHA DE ITAIPU, PARANÁ, BRASIL**

**Flávio Piekarzewicz<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental. Mestrando em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Câmpus Curitiba.

**Eduardo Borges Lied**

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (PEQ/Unioeste). Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Câmpus Medianeira.

**Carla Cristina Bem**

Tecnóloga Ambiental. Mestre e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos pela UFPR.

**Ana Paula Trevisan**

Tecnóloga em Gestão Ambiental. Mestre em Agronomia pela UEM. Doutora em Engenharia Agrícola pela Unioeste.

**Camilo Freddy Mendoza Morejon**

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Professor da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (PEQ/Unioeste).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Brasil, 4232. Jd. Independência - Medianeira - Paraná - CEP: 85884-000 - País - Tel: +55 (45) 3240-8120 - e-mail: [flaviopiekarzewicz@hotmail.com](mailto:flaviopiekarzewicz@hotmail.com)

### **RESUMO**

A redução das perdas nos processos de captação, distribuição, passa pela adequação do sistema de abastecimento de água a pressões compatíveis com a necessidade da rede para atender o consumo. Neste sentido, o presente trabalho buscou avaliar a rede de adução de água do município de Santa Terezinha de Itaipu/PR, caracterizado por apresentar elevado gasto energético, com vistas a dimensionar cenários de otimização para a operação do sistema. Foi utilizado o software EPANET para o processamento dos dados fornecidos pela SANEPAR, associando ao software Qgis para processamento de dados espaciais quanto a elevação e declividade do solo, focando principalmente em dois cenários. O primeiro com os dados brutos fornecidos pela SANEPAR, e o segundo utilizando-se de séries temporais para ativação programada das estações elevatórias, analisando assim possíveis cenários para redução do gasto energético. Ao se considerar o gasto energético envolvido no processo de transporte da água para posterior tratamento, o segundo cenário operando com o potencial de 75% demonstrou ser a faixa mais econômica entre os cenários e faixas de potência avaliados, com 58,9% de redução do gasto de energia.

**PALAVRAS-CHAVE:** demanda hídrica; eficiência energética; simulação.

### **INTRODUÇÃO**

Dentre os recursos naturais caracterizados como a disposição da civilização moderna, a água está presente entre os de maior relevância para a subsistência, por ser um recurso de considerável relevância para a sobrevivência humana e utilizado em diversas atividades como principal insumo. Chega-se ao ponto comum de questionamento global, levando a um debate recorrente e desagradável presente na comunidade internacional, que em sua maioria termina com conflitos regionais ou internacionais (FRACASSO, 2014).

Os processos de urbanização e industrialização desorganizados da sociedade moderna, resultaram em grandes áreas de aglomeração populacional ocasionando um aumento significativo da demanda hídrica nestes centros urbanos. A voracidade com que a sociedade busca o aumento da produção em centros industriais, visando atender as demandas, tem aumentado consideravelmente o uso da água, caracterizam-se assim como principais usos o industrial, doméstico e agrícola (CRUZ; TUCCI, 2008).

Para o Ministério do Meio Ambiente, os empreendimentos industriais são responsáveis pelo consumo de 22% da água tratada, utilizando-se deste volume para seus variados processos industriais, tais como, lavagem de instalações, processo de resfriamento e incorporação em produtos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2010).

Observa-se a utilização da água para consumo agrícola, como suplemento nas situações que as precipitações não atendem as demandas necessárias de umidade na produção agrícola. Nesta classe de uso basicamente é



implementado processos de irrigação e dessedentação de animal, para o qual não é necessário um tratamento prévio. Mesmo apresentando-se como consumo complementar esta classe representa consumo considerável de mais de dois terços da água doce consumida pela comunidade global, caracterizado na maioria dos casos pelos sistemas mal dimensionados, em casos de irrigação.

O uso doméstico composto pelos sistemas de abastecimento de água e saneamento, está contido em um ciclo hídrico interno artificial, originando-se dos processos de captação, passando pelas etapas responsáveis pelo tratamento que promovem o atendimento aos padrões de potabilidade, etapas de transporte ao consumidor final e por fim chegando ao tratamento dos resíduos oriundos do consumo deste recurso pelo homem, em seus sistemas de tratamento de esgoto.

Os sistemas de abastecimento de água, são compostos basicamente pelas etapas de captação, tratamento e transporte, estes apresentam diferentes configurações de acordo com as características e demanda da região a qual tem como objetivo atender a demanda por água tratada.

Considerando o cenário hídrico do Brasil nos últimos anos, busca-se formas para a otimização nos processos de captação, tratamento e distribuição de água. Observam-se duas ramificações que podem ser abordadas para a melhoria nos sistemas. Captação e distribuição de água são os dois setores com grandes possibilidades de otimização.

Na busca pela redução de perdas verifica-se como principal ação aplicada a otimização nos setores de captação, armazenamento e distribuição, diminuindo sua ineficiência e gasto energético (SALVINO, 2009).

A configuração da rede responsável pela adução apresenta especificações que variam de acordo com o relevo, e posicionamento estratégico da estação de tratamento (ETA), o projeto deve ser dimensionado levando em consideração estas variáveis, fato que reduz de forma significante possíveis perdas e gasto energético no processo de adução (PETRUCCI; GONSALVES, 2002).

A modelagem hidráulica através de softwares surge como grande ferramenta, para a simulação de diferentes cenários de um mesmo projeto, minimizando gastos com adequações e reduzindo o tempo necessário para o dimensionamento do sistema. Neste contexto, softwares como EPANET, KYPIPE, WaterCad e Cybernet, tem se destacado por sua versatilidade e possibilidade de integração com outros ambientes.

O software EPANET é voltado para modelagem hidráulica e de qualidade da água, aplicável a diversos sistemas, dos mais simplificados até os sistemas de alta complexidade, possibilitando identificação de falhas, otimização de sistemas em operação e adequação de sistemas projetados, fatos que deram a esta ferramenta um grande destaque quando comparada com os demais softwares de modelagem hidráulica citados anteriormente.

A utilização do modelo no EPANET é feita principalmente em análises de qualidade da água, para verificação e otimização da eficiência do tratamento, encontram-se poucos estudos voltados para as rotinas dinâmicas e estáticas nos sistemas de distribuição que possibilitem a avaliação de situações, tais como, perda de carga, zonas de alta pressão e consumo energético para o bombeamento na rede, resultando em estratégias inovadoras para a gestão dos sistemas visando-se a otimização.

Ressaltar a grande importância na constituição de parceria entre órgãos responsáveis pela gestão de Sistema de Abastecimento de Água (SAA), considerando-se que a reprodutibilidade dos modelos construídos está intimamente ligada a quantidade, precisão e qualidade dos dados sobre o sistema real que se objetiva simular.

Diante do disposto, o presente trabalho, avaliou a viabilidade técnica e econômica de um sistema de abastecimento de água instalada no município de Santa Terezinha de Itaipu-PR, com enfoque voltado para a rede de adução, levando em consideração o relevo, material das tubulações, bombas utilizadas nos processos de bombeamento e gasto energético envolvido no processo.

## **OBJETIVOS**

Simular cenários para rede adutora no município de Santa Terezinha de Itaipu-PR, visando a maximização da eficiência energética. Além disso, o trabalho teve como objetivos específicos os seguintes tópicos:

- Levantar as características da rede de adução do município;
- Levantar características do relevo da região e analisar como o mesmo impacta no transporte da água;
- Avaliar possibilidades de implementação de sistemas de bombeamento automatizado com ativação programada;
- Gerar e Avaliar cenários de otimização energética para a rede.

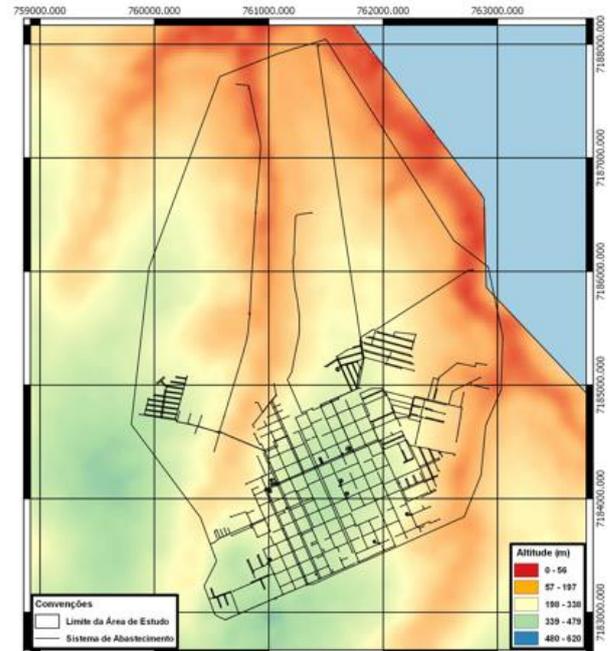
## **METODOLOGIA**

A presente pesquisa foi desenvolvida no município de Santa Terezinha de Itaipu, localizado no oeste do Paraná, o município conta com uma área territorial de 259,4 km<sup>2</sup>, estimativa de 22.992 habitantes para o ano de 2017, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), dados com base no censo de 2010.

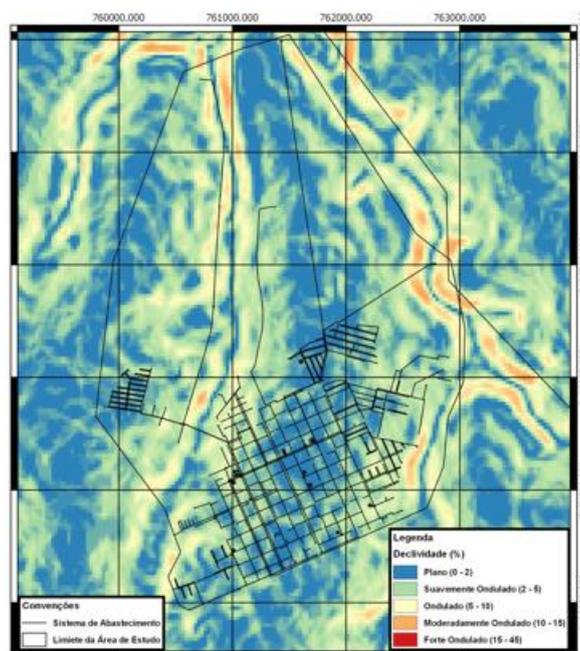


## Rede de abastecimento

A rede de abastecimento público do município de Santa Terezinha de Itaipu, conta com 5 sistemas adutores, quatro destes subterrâneas e um de captação superficial de manancial, a ETA é constituída por três reservatórios para o armazenamento, dois reservatórios apoiados e um reservatório elevado, a rede é responsável por atender a demanda populacional média de 21.274 habitantes concentrados em 7.676 unidades consumidoras, resultando em uma demanda média de 5.025,00 m<sup>3</sup>/dia ou 58,15 l/s. A rede apresenta o índice de atendimento de 100% da demanda do município.



<b>Legenda</b> Paraná Santa Terezinha de Itaipu Área de Estudo Rede de Abastecimento Captação ETA	<b>Sistema de coordenadas</b>	Projeção UTM Zona 21S Datum Sirgas 2000
	<b>Fonte de dados</b>	SANEPAR 2016



**Figura 1: (a) Rede de Distribuição e mapas de (b) hipsometria, e (c) declividade.**

O relevo da área de estudo tem a variação de altitude representada na figura 1. Pode-se observar o comportamento do nível do terreno ao longo da área de interesse, atribuindo-se da informação de que os locais de adução estão localizados em áreas de baixa elevação como o esperado com base nas informações fornecidas pela companhia de saneamento do Paraná.

Realizando-se a comparação dos dados fornecidos pela SANEPAR, com os dados obtidos da plataforma TOPODATA pós-processados no software QGis, observou-se a reprodutibilidade das informações nas duas fontes, enriquecendo o nível de reprodutibilidade do modelo em comparação com o sistema real.

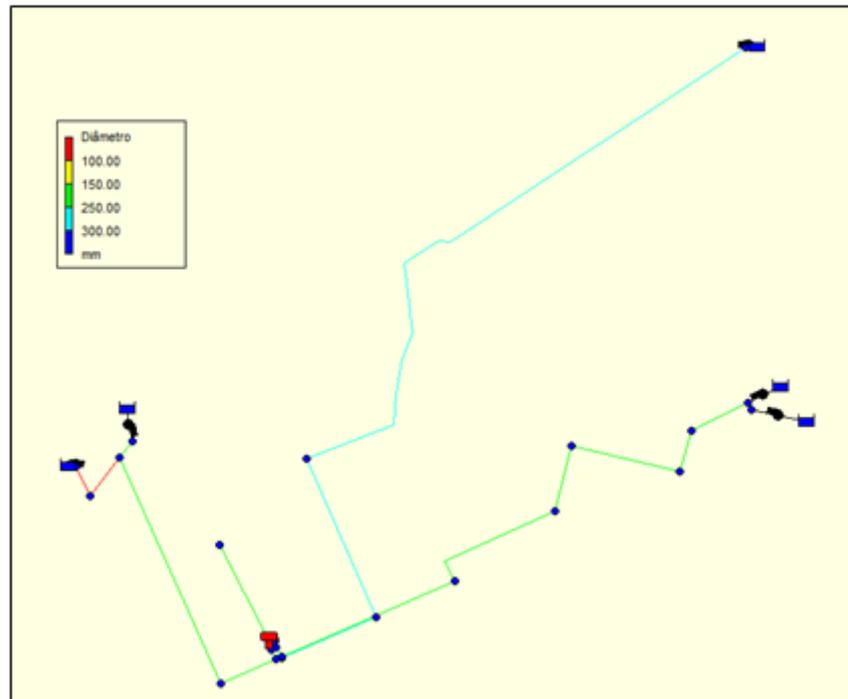
Com a intenção de se avaliar a declividade sobre a qual os trechos da rede adutora estão sendo submetidos, utilizou-se da imagem SRTM do banco de dados do TOPODATA referente ao ano de 2017 com auxílio do processamento no software QGis, para desenvolvimento do mapa de declividade representado na figura 1(c).

Com a declividade representada na figura 1(c), pode-se observar que as áreas de declive mais acentuados estão justamente nos locais onde as aduções iniciam-se, fato esperado levando em consideração que a área onde é feita a captação superficial é um manancial e as demais captações subterrâneas são próximas do mesmo manancial, locais que por características naturais resultam em grandes declives e baixas elevações.

### **Características gerais da rede de interesse**

Para análise das possíveis configurações adotadas nas redes de adução e possibilidades de otimização para os sistemas tendo como base dados fornecidos pela SANEPAR, utilizou-se o software EPANET, modelo matemático computacional que realiza a verificação de diversas configurações de operação para a rede de adução.

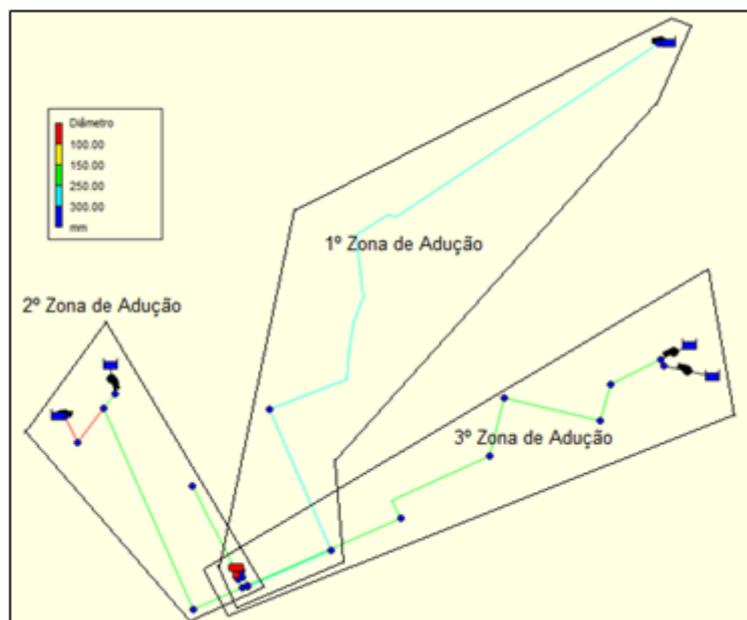
O estudo foi realizado com a contribuição da companhia de saneamento básico do Paraná – SANEPAR, disponibilizando as informações para construção do modelo fiel do sistema adutor. O sistema de captação abrange uma grande área do município como representado na Figura 2, neste sentido, a pesquisa foi direcionada para avaliação das cinco fontes de captação que constituem a rede de adutora do município de Santa Terezinha de Itaipu-PR.



**Figura 2: Identificação da rede de interesse.**

O conjunto adutor é constituído por 5 elevatórias, responsáveis pelo abastecimento da ETA, a somatória das vazões individuais captadas em cada estação elevatória, resulta na capacidade de adução de 78L/s, atendendo a demanda máxima do município atualmente que é de 58,15L/s. O sistema adutor é composto por 6.389,31 metros de extensão, desta extensão aproximadamente 408,54 metros, são por elevação o restante 5.980,77 metros são por gravidade, o material constituinte das tubulações no sistema de adução é de Ferro Fundido, com aproximadamente 20 anos segundo informações da SANEPAR.

Para melhor entendimento quanto ao comportamento da rede adutora, ela foi dividida em três zonas de adução para realizar o estudo conforme representado na figura 3, avaliando de forma individual e comparando o desempenho das zonas entre si para a operação no potencial de 25%, 50% e 75%.



**Figura 3: Espacialização das Zonas Adutoras.**



As redes de adução e distribuição segundo a ABNT/NBR-12218/94 (Projetos de Distribuição de Água para Abastecimento Público), devem ter velocidade de escoamento que varia entre 0,6 m/s – 3,5 m/s, levando em consideração as demandas máximas e mínimas diárias da população que deve ser atendida, pressão estática em tubulações de 50 m.c.a, pressão dinâmica mínima de 10 m.c.a para os nós do sistema. A vazão máxima permitida varia de acordo com o diâmetro da tubulação utilizada, no entanto, deve ter potência suficiente para atender a demanda populacional quanto ao escoamento nos trechos.

A grande limitação do modelo, está relacionada principalmente com a falta de informação quanto as séries temporais para ativação das estações elevatórias. Neste contexto, o presente modelo conta com dois cenários o primeiro levando em consideração operação no período de 24 horas ininterrupto com a potência máxima das estações, o segundo leva em consideração séries temporais associadas ao picos médios de consumo da população, colocando as estações para operar com ativação programada de acordo com a demanda de consumo da população, avaliando a operação em 50%, 75% e 100% das estações elevatórias, visando minimizar o gasto energético e picos de pressão no sistema.

O principal objetivo com o desenvolvimento do modelo é a avaliação das condições de operacionais do sistema com a maior semelhança possível com a rede em operação, caracterizando os dados quanto as variáveis físicas e hidráulicas de interesse, realiza-se o pré-processamento de dados que serão introduzidos no software EPANET. Para o cálculo da perda de carga nas tubulações do presente sistema, foi utilizada a equação de Hazen-Willians, segundo dados do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB a equação é das mais utilizadas atualmente para determinação de escoamento em tubulações com mais de 50mm de diâmetro e turbulentos.

O software permite a utilização de outras duas equações Darcy-Weisbachou conhecida como a fórmula universal teoricamente a com maior precisão e Chezy-Manning que é mais aplicada em escoamentos superficiais.

As informações dos componentes são inseridas no software após a importação do traçado da rede, como citado anteriormente, seguindo uma sequência dos componentes com maior significância para os de menor inicia-se a calibração pelas adutoras e ETA, representados por cinco reservatórios de nível fixo as adutoras, elevadas por cinco bombas hidráulicas correspondentes, os reservatórios de nível fixo tem a função de representar mananciais de captação tal como poços e rios. As bombas hidráulicas representam as elevatórias da rede de adução, a ETA é representada como um reservatório de nível variável para representação da demanda do município.

Posteriormente a calibração das curvas características de funcionamento das bombas, realizou-se a calibração do consumo energético de acordo com o kWh praticado no município de interesse, neste sentido a verificou-se a taxa praticada pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL). A tarifa convencional é aplicada para o uso doméstico, no entanto para o presente estudo foi considerado a faixa de tarifa B3, aplicada a áreas industriais.

Esta calibração foi realizada através do menu DADOS, na interface de navegação para o item de opções selecionando a opção de ENERGIA.

Para as bombas consideradas na presente pesquisa segundo dados dos fabricantes utilizou-se o rendimento igual a 75%, tendo em vista o tempo de uso das mesmas ser próximo aos 30 anos.

A avaliação do sistema foi realizada levando em consideração os dados de funcionamento fornecidos pela companhia para as adutoras, verificando se atendem à demanda máxima do município, gasto energético envolvido no transporte e se está dentro dos padrões da NBR 12218/1994 para dimensionamento de sistemas de abastecimento. Posteriormente realizou-se a análise de faixas para o funcionamento levando em consideração os dados obtidos para a rede de adução, identificando adequações necessárias para simular a melhor condição de operação do sistema, que resulte no menor gasto energético e maior eficiência de transporte.

De posse da localização e definição dos reservatórios e suas funções, realiza-se a calibração das Elevadoras existentes no sistema em conjunto com os cenários de operação, a presente pesquisa avaliou dois cenários e cinco condições distintas.

Para a calibração dos nós neste modelo levou-se em consideração a sua cota e localização no sistema através das coordenadas x e y, ignora-se neste primeiro momento as informações quanto a consumo base, padrão de consumo e pressão. Ignora-se estas grandezas pois as mesmas serão ajustadas pelo modelo quando o mesmo estiver calibrado por completo.

Esta configuração teve como base o banco de dados para as informações de cota do terreno, a planta planialtimétrica do município fornecida pela SANEPAR com precisão de 1 metro e comparação realizada com dados retirados dos mapas de hipsometria e declividade, desenvolvidos utilizando-se do banco de dados do TOPODATA referentes ao ano de 2017 para as imagens SRTM georretificadas utilizadas no desenvolvimento dos mapas no software QGis versão 2.14.

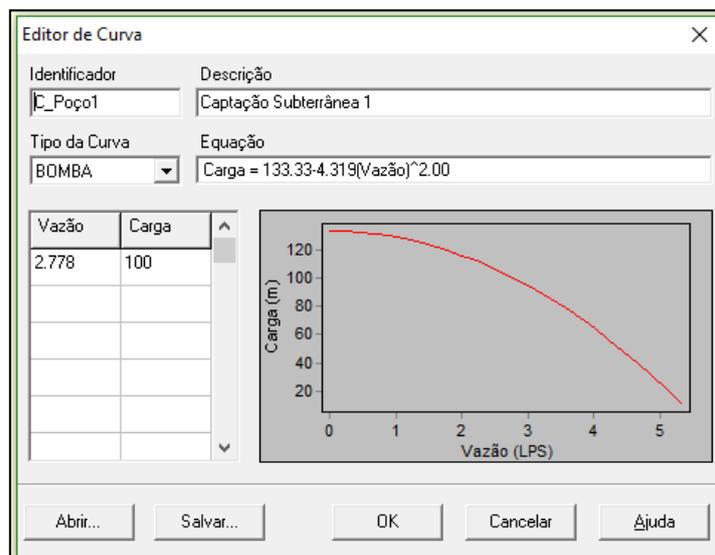
### **Calibração do primeiro cenário**

O primeiro cenário representa a operação das estações elevatórias com base nos dados brutos fornecidos pela companhia de saneamento do Paraná, neste caso em específico, os dados são referentes ao ano de 2017. A Tabela 1 descreve a configuração das estações elevatórias operando em 100% de sua capacidade.

**Tabela 1: Configuração de Elevatórias. Fonte: SANEPAR.**

Elevatórias	Características das Bombas			
	Altura Manométrica (m.c.a)	Potência (cv)	Vazão (m³/h)	Cota (m)
Captação Subterrânea 1	100,00	8,00	10,00	241,00
Captação Subterrânea 2	115,00	12,00	20,00	248,00
Captação Subterrânea 3	110,00	25,00	36,00	238,00
Captação Subterrânea 4	131,00	22,00	38,00	238,00
Captação Superficial 1	30,00	25,00	180,00	220,00

Com base nas informações da Tabela 1 são geradas as curvas de operação para as estações elevatórias do sistema, cada elevatória terá uma curva característica que varia de acordo com a sua vazão e altura manométrica de trabalho, a figura 4 representa a curva característica de funcionamento para a Captação Subterrânea 1.



**Figura 4: Curva Característica da Captação Subterrânea 1.**

As variáveis correlacionadas para gerar a curva característica das bombas, são a vazão (LPS) no eixo das abcissas e carga ou altura manométrica de funcionamento (m) no eixo das ordenadas

### Calibração Segundo Cenário

O software EPANET permite a introdução de uma série temporal, possibilitando a descrição do comportamento do sistema ao longo de um período de tempo determinado, para alguns componentes nesta pesquisa observou-se o comportamento dos nós e Bombas por serem estruturas que permitem atribuição de um comportamento temporal, leva-se em consideração fatores multiplicativos pré-definidos que descrevem o avanço temporal. Foi realizada a edição do padrão de tempo, levando-se em consideração uma série com 16 horas e um passo de tempo ou intervalo de tempo de 1 hora, desta forma atribuiu-se ao software a informação da evolução temporal. Utilizou-se do mesmo padrão temporal para todas as grandezas analisadas nesta pesquisa, no entanto, pode-se configurar o padrão temporal de forma individualizada para cada grandeza, as grandezas com foco de análise nesta pesquisa foram os Nós e Período de Funcionamento das Bombas.

Nesta configuração o modelo irá executar o passo para 16 horas, definiu-se um período de avaliação de 24 horas para observação do comportamento da rede nos dois cenários, para atingir o período de avaliação o modelo



ajusta-se automaticamente, repetindo o passo a cada 16 horas decorridas, até que o mesmo atinja o período de avaliação definido para a simulação.

O segundo cenário operou levando em consideração a série temporal de consumo, neste contexto, avaliou-se a operação do sistema com 100%, 75% e 50% de seu potencial.

Com a variação no potencial de operação das estações elevatórias, avalia-se as possíveis configurações que resultam no melhor cenário energético para o sistema de abastecimento de água, atendendo a demanda de interesse.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Primeiro Cenário

Para avaliação do primeiro cenário, que levou em consideração o sistema em operação atualmente no município, calibrado com as informações fornecidas pela Companhia de Saneamento do Paraná. Verifica-se o comportamento da vazão e velocidade de escoamento nos trechos do, trabalhando com o valor médio para 24 horas de funcionamento para cada componente de forma individualizada, conforme representado na Tabela 2.

**Tabela 2: Distribuição da Vazão e Velocidade de Escoamento Cenário 1 (100%).**

ADUTORA 1 CAPTAÇÃO SUPERFICIAL	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	T8	134136,70	2731,92
	T19	134136,60	2731,92
	T16	134136,60	2731,92
	T24	134136,60	2731,92
	T18	134136,70	2731,92
	ELEVATÓRIA CPS	134136,70	---
	MÉDIA	134136,65	2731,92
ADUTORA 2 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 1 E 2	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	T1374	56751,30	3211,45
	T1373	56751,30	3211,45
	T1372	56751,30	3211,45
	T17	56751,30	3211,45
	T1024	56751,30	3211,45
	T22	56751,30	3211,45
	T23	37956,92	2147,91
	T1039	18794,43	4254,17
	T1040	18794,43	4254,17
	ELEVATÓRIA P2	37956,92	---
	ELEVATÓRIA P1	18794,43	---
	MÉDIA	42982,27	3324,99

A representação deste cenário dá-se pela falta de dados quanto as séries temporais para funcionamento das estações elevatórias, o mesmo serve como base para comparação com os próximos cenários com a incorporação nos modelos das séries temporais baseadas nos picos médios de consumo da população, verifica-se na Tabela 3 a representação dos dados para terceira região adutora.

**Tabela 3: Distribuição da Vazão e Velocidade de Escoamento Cenário 1 (100%).**

ADUTORA 3 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 3 E 4	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	T1370	126332,40	7148,91



	T20	126332,50	7148,92
	T7	126332,50	7148,92
	T21	126332,50	7148,92
	T44	126332,50	7148,92
	T45	126332,60	7148,92
	T46	126332,60	7148,92
	T47	126332,70	7148,92
	T49	60675,91	3716,48
	ELEVATÓRIA P3	60656,82	---
	ELEVATÓRIA P4	60675,91	---
	MÉDIA	108424,45	6767,54

Com base nos dados médios obtidos para vazão e velocidade nas três regiões adutoras do sistema, levando-se em consideração a condição máxima de adução para as estações elevatórias, avaliando para operação durante 24 horas que em sua potência e rotação máxima. Esta configuração não pode ser reproduzida na prática devido as dimensões das tubulações, demanda e disponibilidade hídrica e restrições impostas pela ABNT/NBR-12218/1994 (Projetos de Distribuição de Água para Abastecimento Público) que limita as pressões e velocidade de escoamento conforme descrito anteriormente.

Como resultado do primeiro cenário observa-se a presença de valores exagerados e incompatíveis para pressão nos nós do sistema e perda de carga entre os trechos, outra evidência que representa a pouca reprodutibilidade do sistema modelado em consideração com a realidade, os dados médios para a operação no período de 24 horas para a pressão e perda de carga, são representados na Tabela 3.

O comportamento fica dentro do esperado quanto a distribuição da pressão pelo sistema, verifica-se pela Tabela 4, que as maiores pressões estão concentradas justamente nos nós logo após as estações elevatórias, fato esperado devido à grande pressão de água nestes pontos resultantes da adução de água das fontes de captação, próximo a ETA observa-se as menores pressões, comportamento também dentro do esperado quanto a distribuição, pois para percorrer o sistema adutor a água escoando perde parte de seu potencial energético para vencer as barreiras físicas.

**Tabela 4: Distribuição da Perda de Carga e Pressão no Sistema Cenário 1 (100%).**

	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)
	ADUTORA 1 CAPTAÇÃO SUPERFICIAL	T8	n8 - n13	5,12E+16
T18		n13 - n1454	1,59E+07	1,91E+07
T19		n1454 - n2	6,75E+06	1,91E+07
T16		n2 - n1	1,35E+05	1,91E+07
T24		n1 - ETA	3,10E+05	1,91E+07
MÉDIA		---	1,02E+16	1,91E+07
ADUTORA 2 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 1 E 2		Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)
	T23	n1118 - n1120	1,10E+08	2,20E+08
	T1040	n1122 - 1121	8,99E+07	2,20E+08
	T1039	n1121 - n1120	6,18E+07	2,76E+07
	T22	n1120 - n1105	6,02E+07	5,82E+07
	T1024	n1105 - n1104	2,01E+07	5,82E+07
	T17	n1104 - n1459	1,03E+07	5,82E+13
	T1372	n1459 - n1460	8,53E+06	5,82E+08
T1373	n1460 - n1461	7,75E+06	5,82E+12	



	T1374	n1461 - ETA	6,73E+06	5,09E+08	
	MÉDIA	---	4,17E+07	7,12E+12	
ADUTORA 3 CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA 3 E 4	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)	
	T49	n51 - n49	4,52E+08	7,62E+07	
	T47	n49 - n48	4,50E+08	2,06E+08	
	T46	n48 - n47	4,14E+08	2,56E+08	
	T45	n47 - n46	3,84E+08	2,56E+08	
	T44	n46 - n45	3,05E+08	2,56E+08	
	T21	n45 - n42	2,57E+08	2,56E+08	
	T7	n42 - n31	1,54E+08	2,56E+08	
	T20	n31 - n1457	1,98E+07	2,56E+08	
	T1370	n1457 - ETA	7,73E+06	2,56E+08	
		MÉDIA	---	2,72E+08	2,30E+08

Observa-se que o sistema avaliado de acordo com os dados representados no quadro 6 excede os limites permitidos para velocidade de escoamento e vazão de acordo com a norma regulamentadora e caso entre em funcionamento com esta configuração chegaria ao colapso, causado pelo rompimento das tubulações, no entanto, desconsiderando-se a possibilidade de baixa nos níveis de todas as fontes de captação, rompimento das tubulações, velocidade e vazões aplicadas nos trechos voltando o foco principalmente para a avaliação do gasto energético necessário para o sistema operar em seu 100%, quanto as estações elevatórias.

As estações elevatórias do sistema operando em 100% de seu potencial geram um conjunto de dados impróprios para avaliação precisa do sistema em funcionamento, no entanto, possibilita uma simulação da condição drástica de funcionamento, com as estações operando de forma ininterrupta, possibilitando a previsão do gasto com energia, conforme verifica-se na Tabela 5.

**Tabela 5: Gasto Energético Cenário 1 (100%).**

Elevatórias	Características das Bombas		
	Porcentagem de Utilização (%)	Gasto Energético (R\$/dia)	Rendimento (%)
Captação Subterrânea 1	100,00	4,32E+11	75,00
Captação Subterrânea 2	100,00	4,91E+11	75,00
Captação Subterrânea 3	100,00	5,71E+12	75,00
Captação Subterrânea 4	100,00	6,21E+12	75,00
Captação Superficial 1	100,00	1,44E+12	75,00

Considerando-se o funcionamento das estações elevatórias no período de 24 horas observa-se o gigantesco gasto energético que resultará para cada uma das três zonas adutoras do sistema de abastecimento no município.

### Segundo Cenário

A minimização dos gastos levantados no primeiro cenário de operação, está associada principalmente com o processo de automatização, implementando a ativação programada das estações elevatórias, otimizando seu tempo de utilização para atender a demanda em específica do momento, conforme verifica-se no segundo cenário. Neste foi considerado a série temporal de acordo com a demanda e comparação entre as faixas de 50%, 75% e 100% de potencial de funcionamento das estações.

### Estações elevatórias operando com potencial de 100%



O gasto energético dos sistemas de distribuição de água, está intimamente relacionado com o tempo de bombeamento e a potência com a qual as estações elevatórias operam. Neste cenário, as zonas adutoras operam com 100% de seu potencial, no entanto, sua ativação ocorre de forma programada, o resultado foi o aumento da reprodutibilidade do cenário em campo, e uma redução considerável nos valores das variáveis de interesse. A Tabela 6 apresenta o comportamento das três zonas de adução, em relação à distribuição da vazão ao longo do sistema de captação e velocidade de escoamento nos trechos.

O presente cenário demonstrou uma faixa de variação da velocidade de 1,01 – 2,73 m/s dentro do recomenda pela NBR 12218, e as vazões estiveram condizente com o diâmetro das tubulações fatos que comprovam a princípio que o modelo 100% do cenário dois é mais eficiente que o modelo 100% do cenário um.

A análise da pressão, gasto energético e perda de carga do modelo são expressas nas tabelas 7 e 8, como o esperado houve uma grande redução nas pressões as quais os nós do sistema estão submetidos, na perda de carga entre os trechos e no consumo energético.

**Tabela 6: Distribuição da Vazão e Velocidade de Escoamento Cenário 2 -100%.**

	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	ADUTORA 1 CAPTAÇÃO SUPERFICIAL	T8	54,85
T19		54,74	1,12
T16		54,74	1,12
T24		54,69	1,11
T18		54,80	1,12
ELEVATÓRIA CPS		54,91	
MÉDIA		54,79	1,12
	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	ADUTORA 2 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 1 E 2	T1374	25,94
T1373		25,94	1,47
T1372		25,94	1,47
T17		25,94	1,47
T1024		25,94	1,47
T22		25,94	1,47
T23		17,90	1,01
T1039		8,10	1,83
T1040		8,10	1,83
ELEVATÓRIA P2		17,90	
ELEVATÓRIA P1		8,10	
MÉDIA		19,61	1,50
		Trecho (T)	Vazão Q (l/s)
	ADUTORA 3 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 3 E 4	T1370	47,90
T20		47,96	1,12
T7		47,96	2,71
T21		47,96	2,71
T44		48,01	2,72
T45		48,07	2,72
T46		48,12	2,72
T47		48,18	2,73
T49		26,18	1,48
ELEVATÓRIA P3		22,03	---



	ELEVATÓRIA P4	26,18	---
	MÉDIA	41,69	2,22

Avaliando a Tabela 7, observa-se que a distribuição da pressão segue o mesmo padrão do cenário um estando concentrada nas áreas de subseqüente as elevatórias devido ao grande fluxo imposto pelas estações.

**Tabela 7: Distribuição da Pressão e Perda de Carga no sistema Cenário 2-100%.**

	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)
ADUTORA 1 CAPTAÇÃO SUPERFICIAL	T8	n8 - n13	372,13	10,15
	T18	n13 - n1454	300,43	10,13
	T19	n1454 - n2	288,57	10,11
	T16	n2 - n1	283,21	10,11
	T24	n1 - ETA	283,16	10,09
	MÉDIA	---	---	305,50
ADUTORA 2 CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA 1 E 2	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)
	T23	n1118 - n1120	356,44	19,10
	T1040	n1122 - 1121	391,37	128,70
	T1039	n1121 - n1120	373,75	128,70
	T22	n1120 - n1105	363,34	37,98
	T1024	n1105 - n1104	298,21	37,98
	T17	n1104 - n1459	288,31	37,98
	T1372	n1459 - n1460	287,65	37,98
	T1373	n1460 - n1461	286,65	37,98
	T1374	n1461 - ETA	286,49	263,18
	MÉDIA	---	---	325,80
ADUTORA 3 CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEA 3 E 4	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)
	T49	n51 - n49	537,16	38,61
	T47	n49 - n48	536,27	96,09
	T46	n48 - n47	512,45	119,25
	T45	n47 - n46	489,22	119,00
	T44	n46 - n45	444,68	118,74
	T21	n45 - n42	419,35	118,49
	T7	n42 - n31	362,63	118,49
	T20	n31 - n1457	292,05	118,49
	T1370	n1457 - ETA	287,94	118,23
MÉDIA	---	---	431,31	107,27

A operação utilizando das séries temporais para realizar a ativação das estações elevatórias em conjunto com a demanda de consumo, levando em consideração um armazenamento mínimo no reservatório para equilíbrio de vazão verifica-se grande redução em comparação com um sistema bombeando de forma contínua. Nestas

condições a rede apresenta baixas pressões e pequena perda de carga ao longo da tubulação. A pequena perda pode ser devido à idade da tubulação, fato que prejudica as condições de transporte que a tubulação proporciona para o fluido.

Considerando que ocorreu uma grande redução na pressão a qual o sistema é submetido, vazões e velocidade de escoamento distribuído pelo sistema de captação, o mesmo ocorreu com o gasto energético, fato que é confirmado com os dados presentes na Tabela 8.

**Tabela 8: Demanda Energética Cenário 2 (100%).**

Elevatórias	Características das Bombas		
	Porcentagem de Utilização (%)	Gasto Energético (R\$/dia)	Rendimento (%)
Captação Subterrânea 1	100,00	424,37	75,00
Captação Subterrânea 2	100,00	911,58	75,00
Captação Subterrânea 3	100,00	1886,31	75,00
Captação Subterrânea 4	100,00	2354,18	75,00
Captação Superficial 1	100,00	2782,92	75,00
Total		8359,36	

A Tabela 8 demonstra o gasto energético para um dia de operação em todas as zonas de adução, com todas as estações elevatórias funcionando em 100% de seu potencial e com rendimento de 75%, os dados são referentes a operação das estações com ativação e desativação programada, de acordo com o consumo.

#### **Estações elevatórias operando com potencial de 75%**

Com a operação utilizando 75% do potencial das estações elevatórias, observa-se uma redução de 58.9% no gasto energético diário, para a pressão, velocidade de escoamento, vazão e perda de carga também se verifica uma baixa uma redução média para, devido à redução na rotação das estações que gera consequentemente, menores vazões e distribuição de pressão no sistema com menor intensidade. A Tabela 9 mostra este comportamento da vazão e velocidade de escoamento.

**Tabela 9: Distribuição da Vazão e Velocidade de Escoamento Cenário 2 -75%.**

ADUTORA 1 CAPTAÇÃO SUPERFICIAL	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	T8	35,49	0,72
	T19	35,38	0,72
	T16	35,38	0,72
	T24	35,32	0,72
	T18	35,43	0,72
	ELEVATÓRIA CPS	35,54	--
MÉDIA	35,42	0,72	
ADUTORA 2 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 1 E 2	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	T1374	18,19	1,03
	T1373	18,19	1,03
	T1372	18,19	1,03
	T17	18,19	1,03
	T1024	18,19	1,03
	T22	18,19	1,03
	T23	12,61	0,71
T1039	5,63	1,27	



	T1040	5,63	1,27
	ELEVATÓRIA P2	12,61	--
	ELEVATÓRIA P1	5,63	--
	MÉDIA	13,75	1,05

Observa-se nas médias para as zonas adutoras 1 e 2 a redução de aproximadamente 32,61% nas vazões medidas durante a simulação dos dois cenários, e 32,85% para a velocidade de escoamento, considerando esta significativa baixa nas médias para a vazão o presente sistema de adução permanece na faixa regulamentada pela NBR 12218 para velocidade de escoamento em sistemas de abastecimento e atende à demanda hídrica diária do município que é de aproximadamente 58,15 l/s, observando o potencial de adução de 88,14 l/s, desconsiderando a disponibilidade hídrica nas fontes de captação.

Para a terceira zona adutora, o comportamento não se distanciou muito do observado na zona um e dois, apresentando a redução média da vazão de 27,51% e 15,76% para a média da velocidade de escoamento nas tubulações, e permanece dentro da faixa solicitada pela norma regulamentadora. A Tabela 10 representa a situação para a distribuição da vazão e velocidade de escoamento para o cenário de 75% do potencial em funcionamento.

**Tabela 10: Distribuição da Vazão e Velocidade de Escoamento Cenário 2 -75%.**

ADUTORA 3 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 3 E 4	Trecho (T)	Vazão Q (l/s)	Velocidade v (m/s)
	T1370	34,70	1,97
	T20	34,70	1,97
	T7	34,74	1,97
	T21	34,74	1,97
	T44	34,80	1,97
	T45	34,85	1,97
	T46	34,91	1,98
	T47	34,96	1,98
	T49	18,98	1,07
	ELEVATÓRIA P3	16,04	--
	ELEVATÓRIA P4	18,98	--
	MÉDIA	30,22	1,87

A distribuição da pressão ao longo do sistema apresentou redução na média significativa, no entanto, o comportamento segue como o esperado, sendo as áreas com os maiores valores para a pressão os trechos na sequência das estações elevatórias, tendo em vista o grande fluxo gerado pela sua operação, a Tabela 11 descreve este comportamento com os dados da pressão para cada nó do sistema de adução.

O comportamento da perda de carga distribuída pelo sistema de captação, apresentou o comportamento dentro do esperado levando consideração a idade da tubulação a perda de carga fica na faixa entre 4,49 m/km – 66,61, a grande amplitude justifica-se pela potência aplicada para captação na segunda zona de adução, as estações elevatórias nesta região mesmo operando em 75% de sua capacidade são bastante elevadas quando se compara com as estações da primeira zona de adução.

**Tabela 11: Distribuição da Pressão e Velocidade de Escoamento Cenário 2 -75%.**

ADUTORA 1 CAPTAÇÃO SUPERFICIAL	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)
	T8	n8 - n13	357,00	4,53
	T18	n13 - n1454	295,00	4,52
	T19	n1454 - n2	286,59	4,50
	T16	n2 - n1	282,82	4,50
	T24	n1 - ETA	283,01	4,49



	MÉDIA	---	300,88	4,51
ADUTORA 2 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 1 E 2	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)	Perda de Carga (m/km)
	T23	n1118 - n1120	337,50	9,99
	T1040	n1122 - 1121	358,70	66,61
	T1039	n1121 - n1120	346,80	65,62
	T22	n1120 - n1105	344,93	19,67
	T1024	n1105 - n1104	292,40	19,67
	T17	n1104 - n1459	285,62	19,67
	T1372	n1459 - n1460	285,48	19,67
	T1373	n1460 - n1461	284,72	19,67
	T1374	n1461 - ETA	284,93	19,66
	MÉDIA	---	313,45	28,91
	ADUTORA 3 CAPTAÇÃO SUBTERRANEA 3 E 4	Trecho (T)	NÓS (n)	Pressão (m)
T49		n51 - n49	442,74	21,29
T47		n49 - n48	442,25	53,07
T46		n48 - n47	425,96	65,81
T45		n47 - n46	409,11	65,61
T44		n46 - n45	380,96	65,42
T21		n45 - n42	365,66	65,23
T7		n42 - n31	330,39	65,23
T20		n31 - n1457	287,72	65,23
T1370		n1457 - ETA	286,13	65,03
MÉDIA		---	374,55	65,23

A grande redução no gasto energético para o cenário dois quando comparamos operação com 100% da capacidade e 75% da capacidade, é bastante significativa, a Tabela 12 demonstra de forma individualizada para cada região adutora e o total do gasto energético para o período de 24 horas de operação, desconsiderando disponibilidade hídrica dos pontos de captação.

**Tabela 12: Gasto Energético Cenário 2 -75%.**

Elevatórias	Características das Bombas		
	Porcentagem de Utilização (%)	Gasto Energético (R\$/dia)	Rendimento (%)
Captação Subterrânea 1	100,00	256,55	75,00
Captação Subterrânea 2	100,00	592,50	75,00
Captação Subterrânea 3	100,00	1056,15	75,00
Captação Subterrânea 4	100,00	1332,79	75,00
Captação Superficial 1	100,00	1689,93	75,00
Total		4927,92	

#### **Estações elevatórias operando com potencial de 50%**

O sistema em operação com 50% do seu potencial apresenta velocidades de escoamento inferiores a 0,6 m/s, como é recomendado pela NBR 12218, levando em consideração esta informação, considera-se inviável a

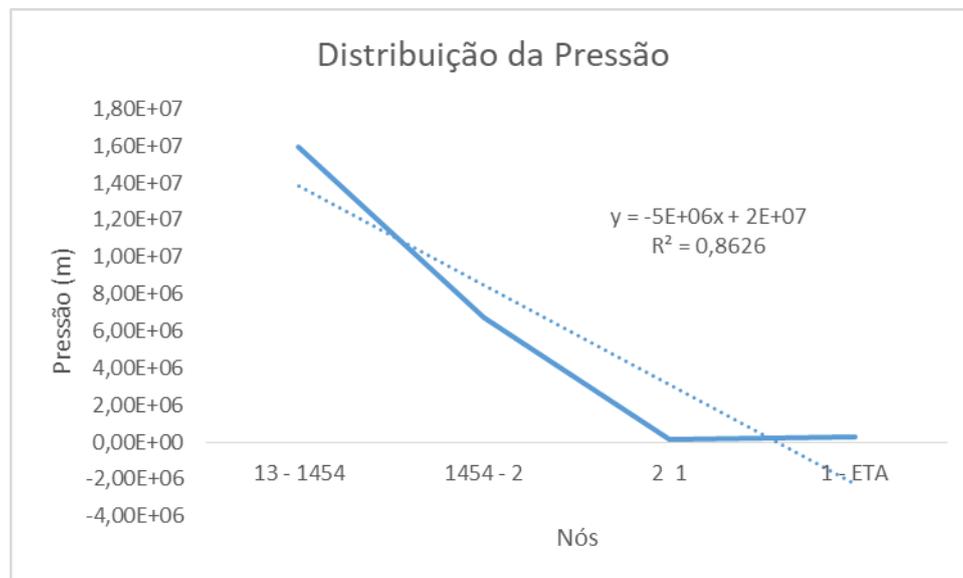
operação nesta faixa de potência, lembrando que com a velocidade de 0,25m/s que o sistema apresenta para a zonas adutoras estas acabam não atendendo a demanda hídrica, e resultando em pressão negativa na ETA, no período posterior ao início do abastecimento.

## Análise Comparativa dos Cenários Simulados

### Primeiro Cenário 100% x Segundo Cenário 100%

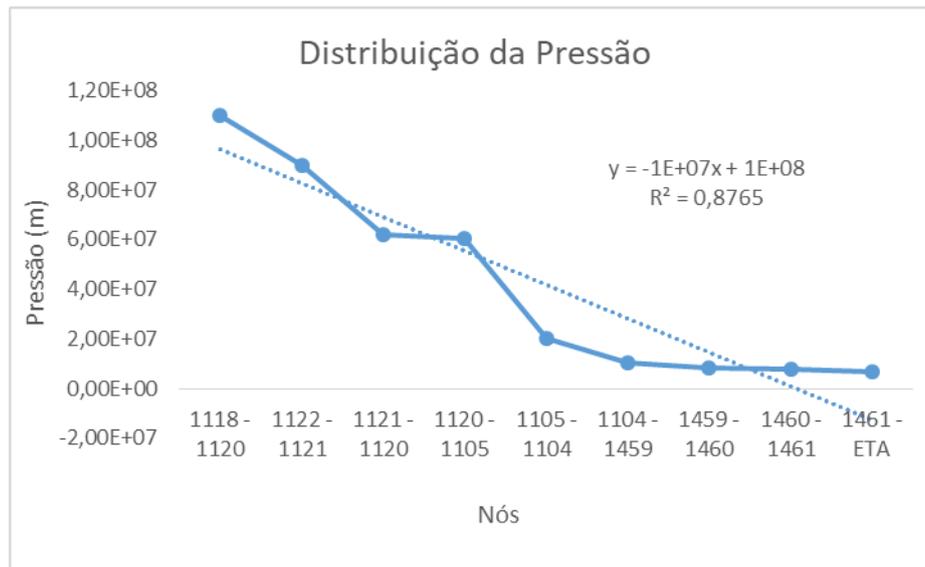
Com base nos dados obtidos da simulação do primeiro cenário e das simulações realizadas no segundo cenário, observa-se o comparativo quanto ao desempenho voltado para a pressão aplicada distribuída no sistema, vazão e gasto energético, para as estações elevatórias operando com 100% de seu potencial de funcionamento.

Com a representação gráfica da distribuição da pressão, pode-se avaliar o comportamento da mesma no sistema, para a simulação modelada no primeiro cenário, compreende-se a impossibilidade quanto a sua implementação levando em consideração os valores assumidos para a pressão, vazão e velocidade de escoamento, que resulto em um gasto energético absurdo, no entanto, volta-se o foco da avaliação para o comportamento e se este segue os padrões esperados, neste contexto a figura 5, representa de forma gráfica a distribuição da pressão.



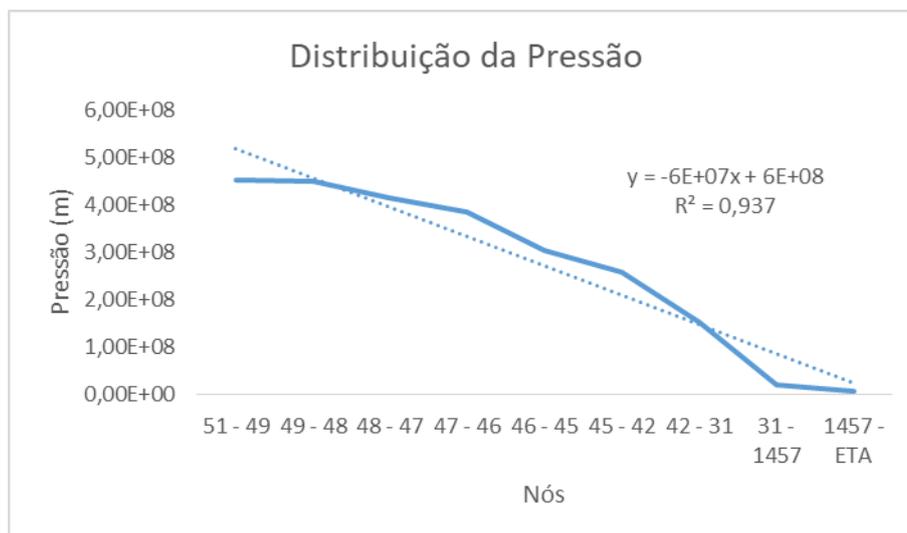
**Figura 5: Gráfico de Distribuição da Pressão 1º Zona de Adução.**

O gráfico da figura 5 descreve o comportamento da pressão para a primeira zona de adução, com base neste comportamento, observa-se que os picos de pressão estão localizados no início da adução e conforme aproxima-se da Estação de Tratamento a pressão vai reduzindo, fato que resulta da perda de carga que o fluido em escoamento sofre ao longo da trajetória, para vencer as barreiras físicas de altitude e rugosidade das tubulações.



**Figura 6: Gráfico de Distribuição da Pressão 2º Zona de Adução.**

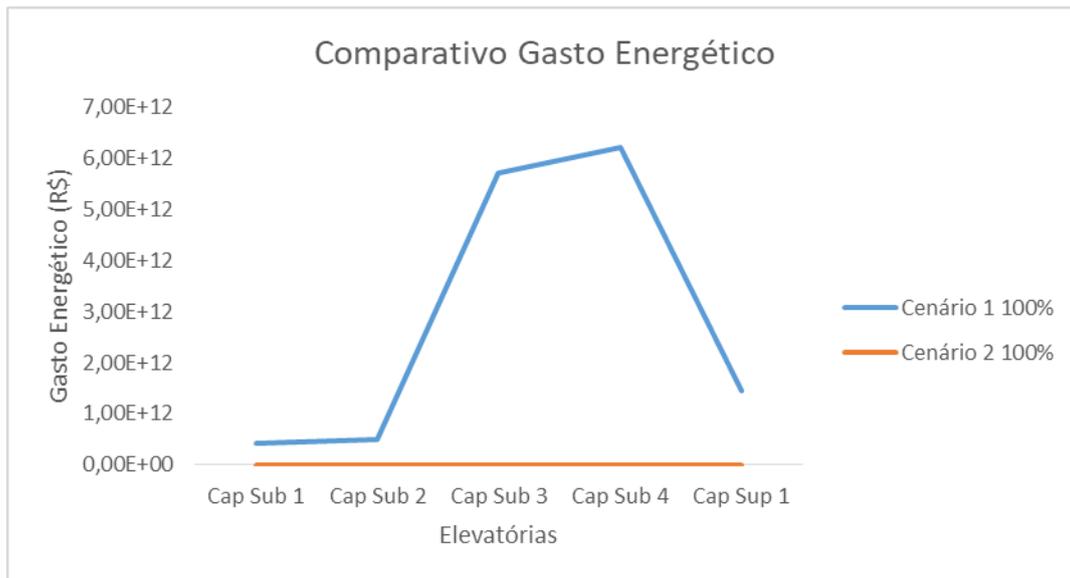
O gráfico da figura 6 descreve o comportamento da pressão para a segunda zona de adução, com base neste comportamento, observa-se que os picos de pressão estão localizados no início da adução e conforme aproxima-se da Estação de Tratamento esta pressão vai reduzindo, fato que resulta da perda de carga que o fluido em escoamento sofre ao longo da trajetória, para vencer as barreiras físicas de altitude e rugosidade das tubulações.



**Figura 7: Gráfico de Distribuição da Pressão 3º Zona de Adução.**

O gráfico representado na figura 7 descreve a distribuição da pressão para o sistema na terceira zona de adução, entre as três zonas de adução modeladas para o primeiro cenário esta foi a que mais aproximou-se de uma relação linear satisfatória, apresentando um coeficiente de relação igual a 0,937.

A avaliação do cenário de pressão é importante para se entender os motivos do gasto energético envolvido no processo de bombeamento desempenhado pelo sistema. Para o primeiro cenário conforme representado na figura 8, verifica-se o gasto simulado.

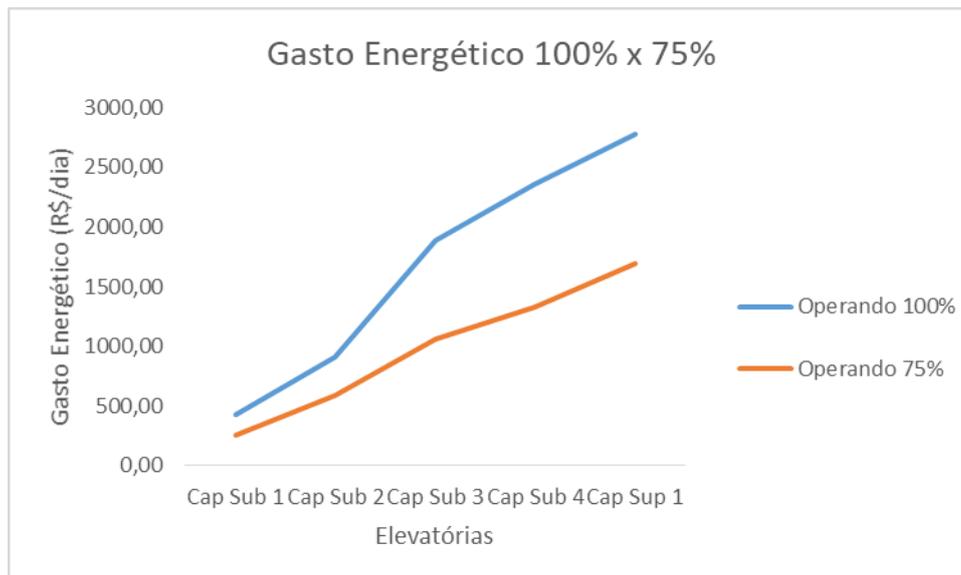


**Figura 8: Comparativo Gasto Energético.**

A figura 8 permite observar a variação absurda do gasto energético quando compara-se o primeiro cenário com o segundo cenário operando em 100% de seu potencial, esta variação justifica-se pela não consideração da série temporal para ativação das estações elevatórias resultando em um primeiro cenário com operação ininterrupta durante as 24 horas para as quais o sistema simulou a adução na rede de interesse.

Avaliação Segundo Cenário 100% x 75% x 50%

Conforme resultados já apresentados, é possível concluir que a implementação do primeiro cenário não é viável. Portanto, a comparação da eficiência energética no segundo cenário para diferentes potências de operação foi importante. A figura 9 representa o gasto energético envolvido no processo de adução pelo período de 24h.



**Figura 9: Comparativo Gasto Energético 100% x 75%.**

Admite-se que a operação nas duas faixas potenciais atende à demanda hídrica de consumo do município, comparando as duas quanto a gasto energético e levando em consideração que o sistema de operação é o mesmo, observa-se na figura 9 que a operação com 75% do potencial de funcionamento das estações elevatórias resulta em um menor gasto energético e maior otimização do sistema.

## CONCLUSÕES

A avaliação da rede de interesse para modelação possibilitou o desenvolvimento de um modelo adaptado da rede de adução do município, deste modo o trabalho descreveu as principais características da rede de adução, propondo distintos cenários de operação e realizando o comparativo entre eles para identificação da melhor potência de operação resultando no menor gasto energético.

Os dois cenários avaliados operaram no período de 1 dia (24 horas), em diferentes faixas de potência 100%, 75% e 50%. O primeiro cenário operando a 100% de seu potencial, demonstrou-se inviável, tendo em vista a elevada faixa de pressão, velocidade de escoamento e gasto energético envolvida em sua operação, devido a desconsideração de séries temporais em sua operação.

O segundo cenário operou em 100%, 75% e 50% de seu potencial, apresentou viabilidade de operação para as faixas de potência de 100% e 75%. Para a faixa de 50% o sistema adutor apresentou velocidade de escoamento inferior ao permitido pela legislação, portanto não é considerado na avaliação energética.

A comparação do segundo cenário operando nas faixas de 100% e 75% resultou na escolha da faixa de operação de 75%. Esse resultado foi devido à grande redução no gasto energético quando operado com a mesma série temporal para ativação programada, resultando em uma redução de 58,9 % do gasto envolvido no transporte e caracterizando-se como melhor cenário para operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/NBR 12218/1994 Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1994.

FRACASSO, Paulo T. Redução de gastos em energia elétrica em sistemas de distribuição de água utilizando processos decisórios de Markov. 2014. 154 f (Tese de doutorado em engenharia hidráulica) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MMA. Sistemas de dessalinização para atender populações em comunidades semi-árido, 2010, Programa Água Doce, MMA 2010. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/programa-agua-doce>> Acessado em 15 ago 2017.

PETRUCCI, Aron L.; GONSALVES, Orestes M. Dimensionamento de Redes prediais de águas sob vazões reais. Associação nacional de tecnologias do ambiente construído, Porto Alegre v.2, n.4 p 27-37, out/dez-2002.

SALVINO, Moisés M. Método de dimensionamento e controle operacional otimizado para redes de distribuição de água. 2009. 76f. (Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.