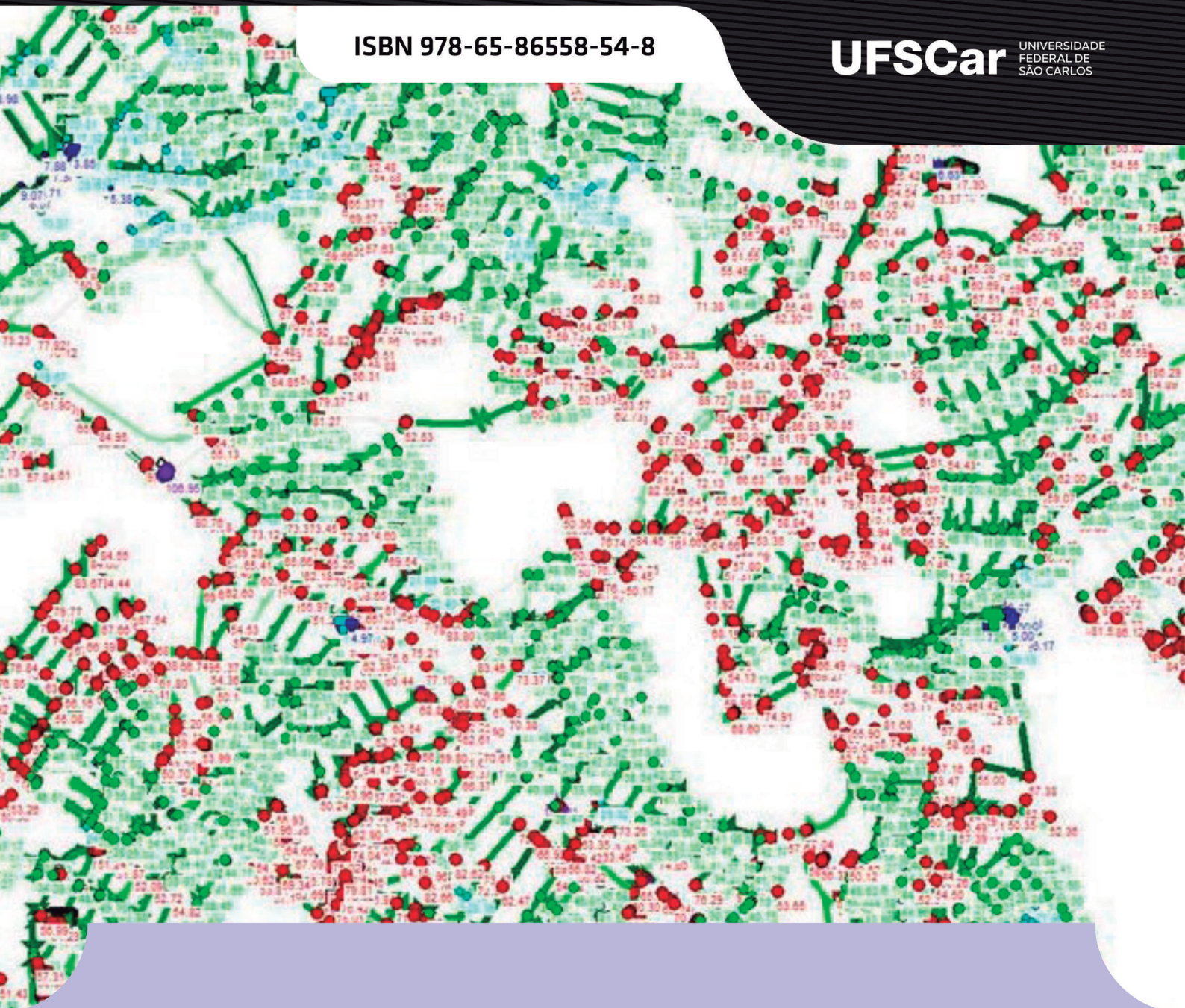


ISBN 978-65-86558-54-8

UFSCar

UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
SÃO CARLOS



ERICH KELLNER

INTRODUÇÃO AO EPANET: SIMULAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA



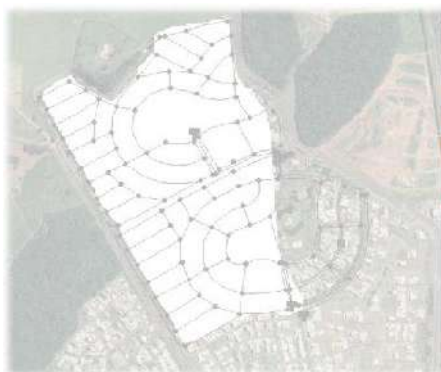
CPOI

Comissão Permanente
de Publicações Oficiais
e Institucionais da UFSCar

A proposta deste livro surgiu durante a pandemia de COVID-19, que se aplacou sobre o mundo logo no início de 2020, de maneira a permitir a capacitação, a distância, dos alunos do curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar.

Não obstante, o livro pode ser utilizado tanto por profissionais que atuam na área do saneamento, quanto aos alunos de graduação que desejam adquirir competência e desenvolver habilidades no emprego de uma das primeiras e mais simples ferramentas para análise do comportamento hidráulico de sistemas de abastecimento, o EPANET.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**



ACIEPE

**INTRODUÇÃO AO EPANET:
Simulação e Dimensionamento de Sistemas
de Abastecimento de Água**

Prof. Dr. Erich Kellner



Comissão Permanente
de Publicações Oficiais
e Institucionais da UFSCar



São Carlos, SP
Abril, 2022

© 2022 by Erich Kellner.

Direitos dessa edição reservados à Comissão Permanente de Publicações Oficiais e
Institucionais - CPOI

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra sem a autorização expressa do Editor.

Editoração eletrônica: Erich Kellner/Alex Rogério Silva

Revisão Linguística: Alex Rogério Silva

Normalização e Ficha Catalográfica: Marina P. Freitas CRB-08/ 6069

Dados internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Kellner, Erich.

Introdução ao EPANET: Simulação e dimensionamento de sistemas de
abastecimento de água / Erich Kellner – São Carlos : UFSCar/CPOI, 2022.
186 p.

ISBN 978-65-86558-54-8

1. Sistemas de abastecimento de água. 2. Saneamento básico. 3. Modelo
computacional. 4. Métodos de Simulação. I. Título.



Reitora

Ana Beatriz de Oliveira

Vice-Reitor

Maria de Jesus Dutra dos Reis



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição-Não
Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional.

Texto da Licença:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt>

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	5
1.1	Como o livro está organizado.....	5
1.2	Instalando o EPANET	6
1.3	O porquê do EPANET.....	9
2	CONHECENDO O EPANET	10
2.1	Estrutura Geral e Principais Componentes do EPANET	11
2.2	Componentes para Criação de um Projeto no EPANET	12
2.2.1	Componentes Físicos	12
2.2.2	Componentes Não Físicos	27
2.2.3	Mapa Mental das Relações de Dependência entre as Componentes Físicas e Não-Físicas existentes no EPANET	44
2.3	O visualizador/navegador (Browser).....	45
2.3.1	A aba <i>Data</i> do <i>Browser</i>.....	45
2.3.2	A aba <i>Map</i> do <i>Browser</i>	47
2.4	Executando e Analisando um projeto	50
2.4.1	Executando (Run) um projeto	51
2.4.2	Procurando por um componente físico (<i>Find</i>).....	53
2.4.3	Investigando as características dos componentes físicos (<i>Query</i>).....	55
2.4.4	Obtendo Resultados em Gráficos (<i>Graph</i>).....	56
2.4.5	Obtendo Resultados em Tabelas (<i>Table</i>).....	57
2.5	Salvando, Lendo, Exportando e Importando um Arquivo.....	59
3	CONFIGURANDO UM PROJETO NO EPANET.....	61
3.1	Alterando as propriedades Default.....	61
3.1.1	<i>Diâmetro Comercial e Diâmetro Interno</i>	64
3.1.2	<i>Coefficientes de Perda de Carga Distribuída (Pipe Roughness)</i>	66
3.2	Verificando as opções adotadas no projeto (Analysis Options...).....	67
3.3	Preenchendo o Sumário do Projeto	67
3.4	Alterando as Opções do Map (MapOptions)	69
3.5	Alterando as Legendas dos Mapas (Maps Legends)	70
4	MEU PRIMEIRO PROJETO NO EPANET	71
4.1	Testando Meus Conhecimentos.....	71
4.1.1	EXERCÍCIO 1: Trabalhando com perdas de carga localizada-Sifão.....	72

4.1.2	EXERCÍCIO 2: Variação temporal do consumo de água	77
4.1.3	EXERCÍCIO 3: Sistema de Recalque	83
5	DESENHANDO E DIMENSIONANDO UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	87
5.1	Características de um Sistema de Abastecimento de Água (SAA)	87
5.2	Modelando unidades de um SAA no EPANET	90
5.2.1	<i>Modelando um hidrante urbano de Coluna</i>	90
5.2.2	<i>Modelando um registro de descarga/limpeza da rede</i>	92
5.2.3	<i>Modelando o bombeamento de um poço profundo</i>	93
5.2.4	Modelando um RNV com entrada superior ao nível máximo de água.....	94
5.2.5	Simulando origens de vazão ou pontos de ligações a outros sistemas	94
5.3	Desenhando um sistema de abastecimento de água	95
5.3.1	<i>Importando dados parciais de uma rede</i>	95
5.3.2	<i>Inserindo e Escalando um Mapa na tela do EPANET</i>	97
5.3.3	<i>Traçando uma rede de distribuição de água com o Auto-Lenght</i>	104
5.3.4	<i>Estabelecendo as cotas de elevação dos nós</i>	106
5.4	Dimensionando um Sistema de Abastecimento de Água	109
5.4.1	<i>Estabelecimento dos Parâmetros de Projeto e Determinação das vazões características</i>	110
5.4.2	<i>Dimensionando a rede de distribuição</i>	113
5.4.3	<i>Dimensionando o Volume de Reservação e Estabelecendo as Cotas Características do Reservatório.</i>	122
5.4.4	<i>Avaliação do funcionamento dos hidrantes após o dimensionamento dos trechos da rede e definição das alturas características do reservatório</i>	125
5.4.5	<i>Dimensionando o Sistema de Bombeamento do Poço</i>	126
6	SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA..	131
6.1	Padrões Temporais.....	131
6.2	Escrevendo regras para simulação operacional.....	134
6.3	Simulação Hidráulica	136
6.4	Simulação do Consumo de Energia	136
6.5	Simulação da Qualidade da Água	140
6.5.1	<i>Determinação das Concentrações de Cloro</i>	140
6.5.2	<i>Determinação do tempo de percurso da água</i>	148
6.5.3	<i>Determinando a Idade da Água (ou tempo de Residência)</i>	150
7	“MODELANDO” A DESPEDIDA.....	152
8	REFERÊNCIAS	153

1 INTRODUÇÃO

A proposta deste livro surgiu durante a pandemia de COVID-19, que se aplacou sobre o mundo logo no início de 2020, de maneira a permitir a capacitação, a distância, dos alunos do curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

Não obstante, o livro pode ser utilizado tanto por profissionais que atuam na área do saneamento, quanto aos alunos de graduação que desejam adquirir competência e desenvolver suas habilidades no emprego de uma das primeiras e mais simples ferramentas para análise do comportamento hidráulico de sistemas de abastecimento, o EPANET.

Tive a preocupação de apresentar exercícios resolvidos e de propor vários outros para que o leitor possa treinar suas habilidades junto à ferramenta.

Embora seja imprescindível o conhecimento dos conceitos básicos em Hidráulica e Saneamento para o entendimento e análise de um sistema de abastecimento de água, buscou-se trabalhar apenas com a utilização do EPANET.

Apesar de ter sido desenvolvida com esmero na apresentação das informações, nem tudo é perfeito! Assim, qualquer incorreção que seja identificada, tenha a bondade de informar-me pelo e-mail: erich.kellner@ufscar.br.

Ao clicar na imagem abaixo você encontrará alguns vídeos, disponibilizados através do *Google Drive*, que poderão ajudá-lo neste percurso.



1.1 Como o livro está organizado

O livro foi organizado de maneira a apresentar progressivamente e de ordem lógica o desenvolvimento de um sistema de abastecimento de água, aumentando o nível de dificuldade ao longo dos capítulos. Contudo, o leitor poderá avançar os capítulos livremente, caso já tenha familiaridade com o tema.

Além disso, buscou-se adotar uma linguagem clara e direta sobre o assunto, sem se preocupar com deduções e até mesmo ignorando algumas normas técnicas da ABNT quanto à padronização do texto, unicamente para, na visão do autor, ser mais claro ao leitor.

IMPORTANTE: Ao longo do livro surgirão palavras em modo *itálico e em negrito* que, em geral, referem-se a algum comando usado pelo EPANET; outras vezes surgirão palavras apenas em *itálico*, cuja intenção foi chamar a atenção para o termo ou por tratar-se de uma palavra em língua inglesa, mas usualmente empregada no termo técnico.

O livro está dividido em nove capítulos:

- 1 - INTRODUÇÃO: apresenta um breve relato sobre o tema, abordando a forma de instalar o *software* EPANET e o porquê de usá-lo;
- 2 - CONHECENDO O EPANET: traz uma apresentação geral do software e dos seus principais comandos;
- 3 - CONFIGURANDO O EPANET: apresenta uma espécie de “ritual” que deve ser seguido pelo leitor toda vez antes de iniciar um projeto no EPANET;
- 4 - MEU PRIMEIRO DIMENSIONAMENTO USANDO O EPANET: apresenta alguns exercícios resolvidos no EPANET e propõe a resolução de outros ao leitor;
- 5 - DESENHANDO E DIMENSIONAMENTO UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: traz um passo-a-passo para desenhar e dimensionar um sistema de abastecimento de água;
- 6 - DETALHANDO UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E SIMULANDO CENÁRIOS: permite que o leitor possa criar condições operacionais para o sistema de distribuição e analisar cenários de simulação;
- 7 - QUALIDADE: permite que o leitor faça simulações, principalmente sobre a determinação da concentração de cloro em uma rede de distribuição de água;
- 8 - DESPEDIDA: são apresentadas algumas notas conclusivas;
- 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS: são apresentadas as obras utilizadas e aquelas que o autor recomenda para um maior aprofundamento no tema.

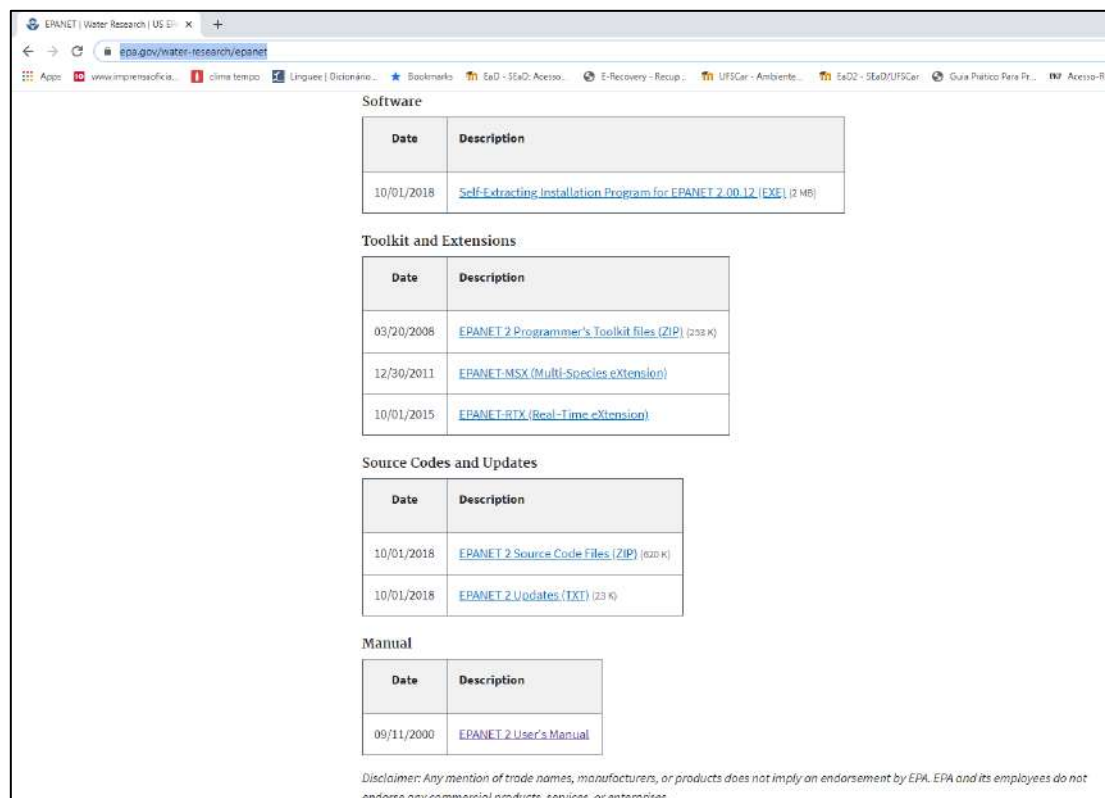
1.2 Instalando o EPANET

Há várias versões disponíveis do EPANET na Web, algumas com funcionalidades específicas, desenvolvidas, em geral, por cooperações entre instituições de pesquisa e a agência americana *EPA-Environmental Protection Agency*.

Neste livro trabalhou-se com a versão original (em inglês) do EPANET e desenvolvida exclusivamente pela *EPA* e disponibilizada no site <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

A **Figura 1** ilustra parcialmente a tela apresentada no site da *EPA* para a instalação do EPANET.

Figura 1: Parte da tela apresentada pelo site da EPA para instalação do EPANET – Acesso em 27/04/2020.



Fonte: O autor

Ao observarmos a **Figura 1** é possível perceber que há quatro áreas temáticas que possuem conteúdo para serem baixados: **Software**, que trata especificamente da instalação do arquivo executável (.EXE) do EPANET; **Toolkit and Extensions** e **Source Codes and Updates** que tratam de ferramentas para desenvolvedores de modelos computacionais, que se apoiam nos modelos de cálculo do EPANET, e **Manual** que permite baixar o manual de instruções do EPANET.

Para o desenvolvimento das atividades desta apostila, baixe o conteúdo do **Software** para a instalação do módulo executável do EPANET.

Recomenda-se fortemente a instalação do Manual do Usuário do EPANET, disponibilizado no conteúdo **Manual**.

Os conteúdos disponíveis em **Toolkit and Extensions** e **Source Codes and Updates** não serão abordados nesta apostila.

Assim, ao selecionar [Self-Extracting Installation Program for EPANET 2.00.12 \(EXE\)](#) disponível em Software, será baixado o arquivo **en2setup2.00.12.01.exe** que é o instalador do EPANET.

Ao abrir esse arquivo, surgirá uma tela semelhante apresentada na **Figura 2**:

Figura 2: Tela apresentada para instalação do EPANET.

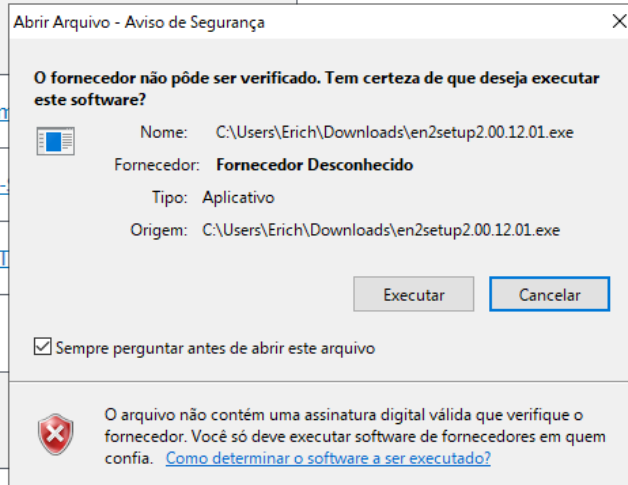
Software

Date	Description
10/01/2018	Self-Extracting Installation Program for EPANET 2.00.12 (EXE) (2 MB)

Toolkit and Extensions

Date	Description
03/20/2008	EPANET 2 Program
12/30/2011	EPANET-MSX (Multi-Platform)
10/01/2015	EPANET-RTX (Real-Time)

Date	Description
10/01/2018	EPANET 2 Source Code Files (ZIP) (620 K)



Fonte: O autor

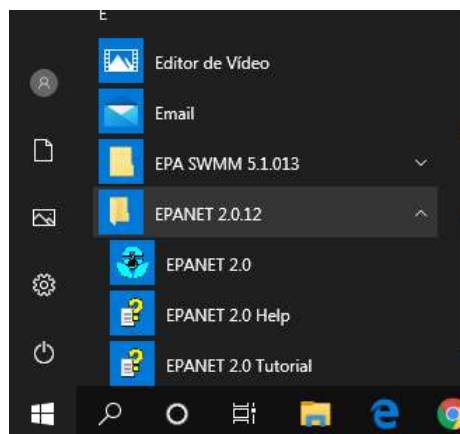
Ao selecionar **EXECUTAR**, será instalada a versão 2.00.12.01 de 1º/outubro/2018 do EPANET.

Em seu computador, ou área de trabalho, surgirá o ícone .

A

Figura 3 permitirá a visualização do EPANET, após a instalação no ambiente Windows:

Figura 3: Resultado da instalação do EPANET no ambiente Windows.



Fonte: O autor

Ao observar a **Figura 3**, deve-se reparar que juntamente com o **EPANET 2.0** são instalados os arquivos **EPANET 2.0 Help** e **EPANET 2.0 Tutorial**. Eles serão essenciais para auxiliar o leitor no desenvolvimento de projetos no EPANET.

1.3 O porquê do EPANET

Arnalich (2007), em sua obra *Epanet y Cooperación*, trouxe uma curiosa e triste informação sobre o futuro do EPANET. Segundo o autor, a continuidade do desenvolvimento do EPANET foi travada pelos tribunais americanos devido a uma ação movida por empresas de softwares, que curiosamente utilizam a base de cálculo do EPANET, as quais alegaram competição desleal de um órgão público, no caso a *EPA – Environmental Protection Agency*.

Embora sejam lançadas novas versões incorporando correções e/ou novas funcionalidades, não se deve esperar nenhuma alteração que deixem os fabricantes de software nervosos. O resultado é que algumas melhorias muito desejáveis estão congeladas, fundamentalmente em duas direções:

- Na integração com outros programas como AutoCad, Sistemas de Informação Geográfica, ou compartilhamento com planilhas eletrônicas;
- Algumas funcionalidades estão muito atrasadas. Por exemplo, não há comando para desfazer o último comando!

Dessa maneira, o leitor poderá vir a pensar que o EPANET é um “fóssil vivo”.

Por ser um software com código aberto (o que significa que todos que conheçam linguagem de programação podem verificar como os cálculos estão sendo feitos), de distribuição gratuita e sem limitadores de uso, é um modelo muito utilizado por universidades, pesquisadores, para o desenvolvimento de ferramentas que permitam a melhoria das funcionalidades do EPANET, ou por instituições ou profissionais que não disponham de muitos recursos para a compra de um software comercial com mais funcionalidades.

Isso me lembra, certa vez, quando participei de uma apresentação de um famoso software comercial para análise do comportamento hidráulico de sistemas de abastecimento, o palestrante o apresentou como a “Ferrari das Ferraris”! O valor cobrado por uma das versões mais simples do *software* demandaria o montante financeiro equivalente a quatro ou cinco salários de professor universitário.

Ao mesmo tempo em que me frustrei, percebi que a “Ferrari das Ferraris”, embora seja um belíssimo carro e desejado por muitos, pode não ser o melhor veículo para se dirigir em uma estrada de terra esburacada.

Apaixonei-me pelo EPANET e espero que ele atenda às necessidades do leitor. Vamos a programação!

2 CONHECENDO O EPANET

O EPANET é um software de simulação hidráulica e de qualidade da água desenvolvido pela **EPA** – *Environmental Protection Agency*, dos Estados Unidos, que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade em sistemas de distribuição de água.

Várias das referências técnicas destacam o EPANET, entre outros programas disponíveis, pois é distribuído gratuitamente e tem seu código-fonte aberto, permitindo a incorporação de várias rotinas de cálculo adicionais.

A partir das características da rede de distribuição de água (material, comprimento e diâmetro das tubulações e da demanda nos nós) e das características topográficas (cotas topográficas dos nós), obtêm-se os valores de perda de carga, velocidade e vazão em cada trecho, e da carga hidráulica e pressão em cada nó, seja em um único instante, seja ao longo de um determinado tempo, considerando a variação da demanda nos nós.

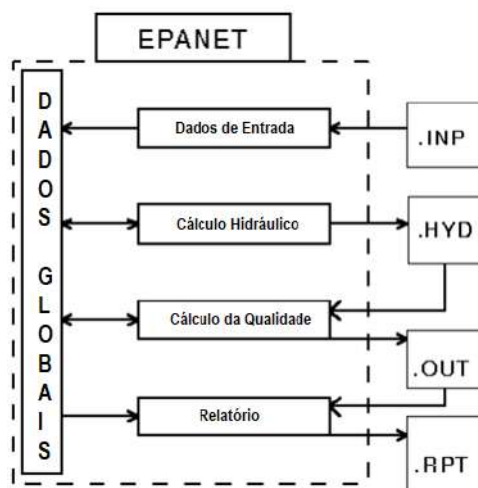
O EPANET possibilita analisar estratégias alternativas de gestão e poderá incorporar outros programas, pelo fato das rotinas de cálculo estarem disponíveis em uma biblioteca de vínculo dinâmico de funções que permitem a personalização de procedimentos, de acordo com as necessidades de cada usuário. Nesse caso, no entanto, é necessário que o usuário conheça um pouco sobre linguagens de programação (Python, C/C+, Visual Basic, entre outras).

A partir das características da rede e das simulações realizadas, o EPANET poderá gerar quatro tipos de relatórios.

A

Figura 4 ilustra, de maneira simplificada, os relatórios gerados pelo EPANET:

Figura 4: Extensões dos arquivos de simulações e relatórios gerados pelo EPANET.



Fonte: Traduzido do ROSSMAN (2000)

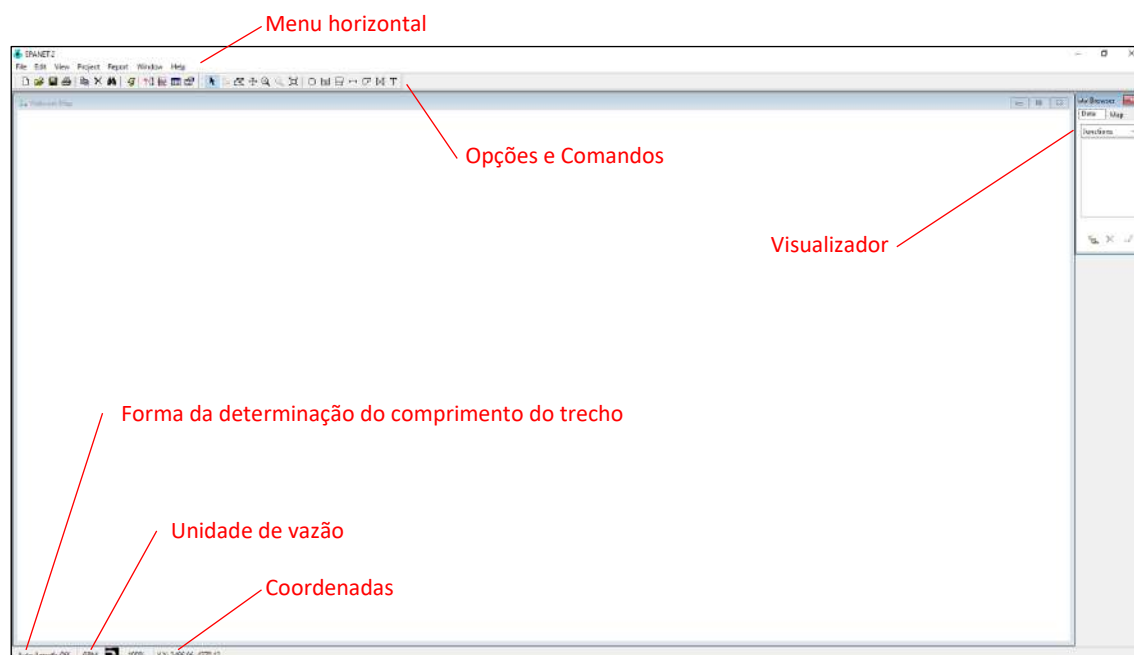
Dentre os arquivos específicos que o EPANET gera após uma simulação, destacam-se aqueles com as extensões:

- **.INP** – Trata-se do módulo processador de entrada, o qual recebe uma descrição da rede a ser simulada a partir de um conjunto de dados externos. O conteúdo do arquivo é analisado, interpretado e armazenado em uma área de memória compartilhada;
- **.HYD** – Trata-se do módulo de resolução hidráulica o qual realiza uma simulação hidráulica para um momento específico ou um intervalo de tempo específico. Os resultados obtidos em cada passo de tempo são escritos para um arquivo hidráulico não formatado;
- **.OUT** - Se uma simulação de qualidade da água é solicitada, o módulo de qualidade da água acessa os dados de fluxo do arquivo de sistema hidráulico (HYD), uma vez que calcula o transporte de substâncias e reação em toda a rede para cada passo de tempo;
- **.RPT** – Trata-se de um módulo gerador de relatório, que lê os resultados da simulação, armazenados no arquivo de saída não formatados (OUT), escrevendo os valores em um relatório formatado. Qualquer erro ou mensagens de aviso geradas durante a execução também são gravadas neste arquivo.

2.1 Estrutura Geral e Principais Componentes do EPANET

Ao iniciar o EPANET, o leitor visualizará uma tela semelhante à apresentada na **Figura 5**, na qual estará apresentada a estrutura geral do EPANET, assim como os componentes necessários para criação de um projeto:

Figura 5: Tela inicial do EPANET.



Fonte: O autor

2.2 Componentes para Criação de um Projeto no EPANET

Para a criação de um projeto no EPANET são necessários componentes que permitam a inserção diretamente pelo software, também chamado de *componentes físicos*, e componentes que, em geral, descrevem o funcionamento de algum outro componente ou de uma rotina operacional e que são chamados de *componentes não físicos*.

2.2.1 Componentes Físicos

Os componentes que podem ser inseridos diretamente em um projeto no EPANET são denominados componentes físicos.

Os componentes físicos têm suas características específicas definidas em janelas, como se verá mais adiante.

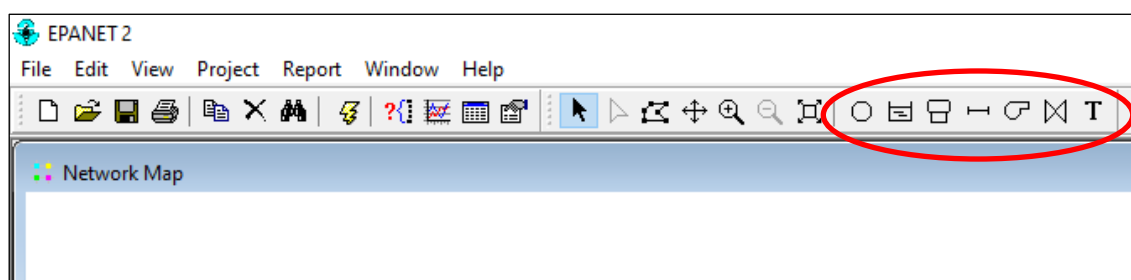
De maneira geral, são os componentes físicos que determinam a topologia do sistema de abastecimento.

Os *componentes físicos* empregados na criação de um projeto no EPANET localizam-se na parte superior da tela do programa, logo abaixo do Menu Horizontal, conforme apresentado na

Figura 6, sendo compostos por: **nó (junction)** , **reservatório de nível constante (reservoir)** , **reservatório de nível variável (tank)** , **tubulação (pipe)** , **bomba (pump)** , **válvulas (valve)**  e **etiqueta (Label)** , que não é propriamente um componente de criação de um projeto, mas permite posicionar uma etiqueta para identificar qualquer um dos demais componentes.

Figura 6 apresenta a localização dos componentes físicos considerados pelo EPANET:

Figura 6: Componentes para criação de um projeto no EPANET.



Fonte: o autor

2.2.1.1 Componente nó (junction)

Em geral, um sistema de abastecimento é formado por vários nós.

Em um projeto de sistema de abastecimento, um nó pode representar um determinado ponto característico de uma tubulação (um ponto alto, por exemplo), a mudança de alguma característica da tubulação (comprimento, diâmetro, rugosidade), a junção de dois ou mais trechos de tubulação.

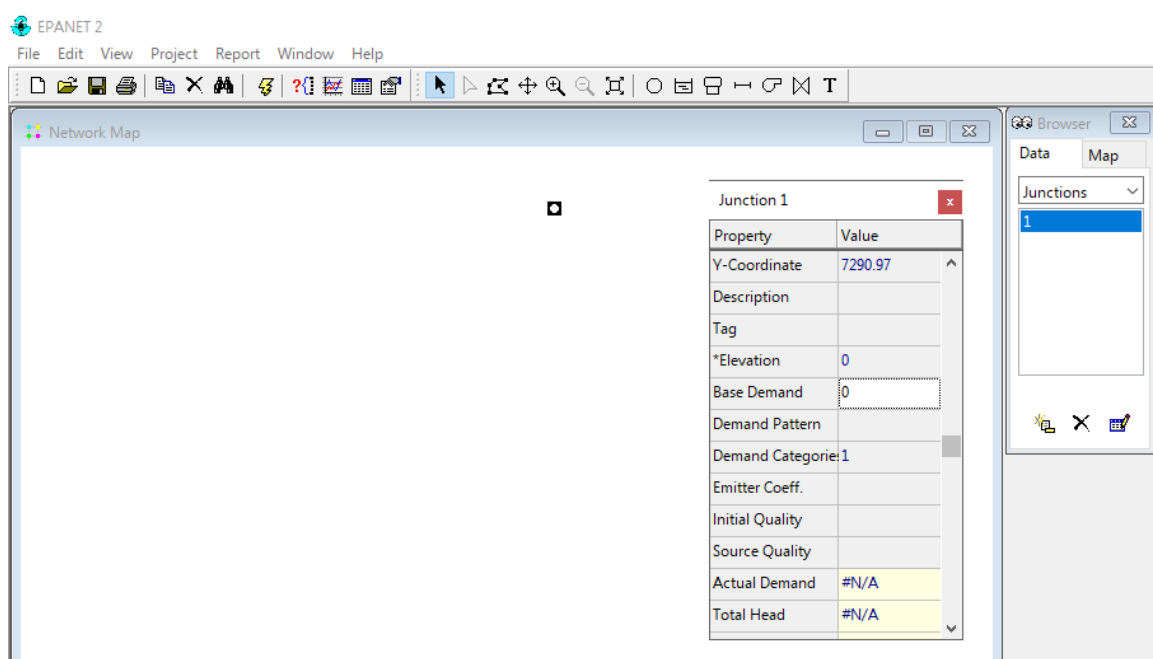
Uma tubulação, bomba ou válvula sempre estará entre dois nós. Nesse caso, pode-se considerar que os reservatórios de nível constante (**reservoir**) e de nível variável (**tank**) são dois nós com características tão peculiares que são tratados a parte.

Em uma rede de distribuição, por exemplo, os carregamentos referentes ao consumo de água são feitos nos nós, ou a simulação de vazamentos, são nos nós que são inseridas as condições para isso.

Clicando duas vezes com o ponteiro do mouse sobre um nó, é apresentado com as características específicas daquele nó, além desse nó ficar evidenciado no box de visualizador. A

Figura 7 ilustra as características específicas do nó (**junction**) selecionado:

Figura 7: Apresentação das características específicas de um determinado nó (**Junction**) selecionado.



Fonte: O autor

Dentre as características específicas apresentadas, destaco as coordenadas X e Y do nó, obtidas diretamente pelo EPANET a partir do posicionamento do nó em planta; a Elevação (***Elevation**) que corresponde à cota de elevação (Z) do nó em relação a um plano referencial, ao consumo médio de água concentrado naquele nó (unidade de vazão), assim como, após a realização do cálculo, a pressão (**Pressure**) e a carga hidráulica (**Total Head**) naquele ponto.

Chamo a atenção também para o parâmetro *Coeficiente do Emissor* (**Emitter Coeff**). No caso de dispositivos hidráulicos cujas vazões de emissão estão associadas à carga de pressão,

como hidrantes de coluna, *sprinkler*, orifícios, tem-se a equação de Torricelli, estabelecida pela **Equação 01**:

$$Q_{emissor} = S \cdot C \cdot P^e \quad (01)$$

Onde: **C** é o Coeficiente de vazão do emissor (**Emitter coeff.**) estabelecido no quadro de características específicas do nó, e **e** que é o expoente do emissor (**Emitter Exp.**), estabelecido no **Default** do EPANET, **S** refere-se à seção transversal da tubulação imediatamente a montante do nó.

2.2.1.2 Componente tubulação (pipe)

Todo sistema de abastecimento de água é formado por tubulações, as quais estão sempre posicionadas entre dois nós, incluindo aí os nós especiais como estou considerando os reservatórios de nível constante e o reservatório de nível variável.

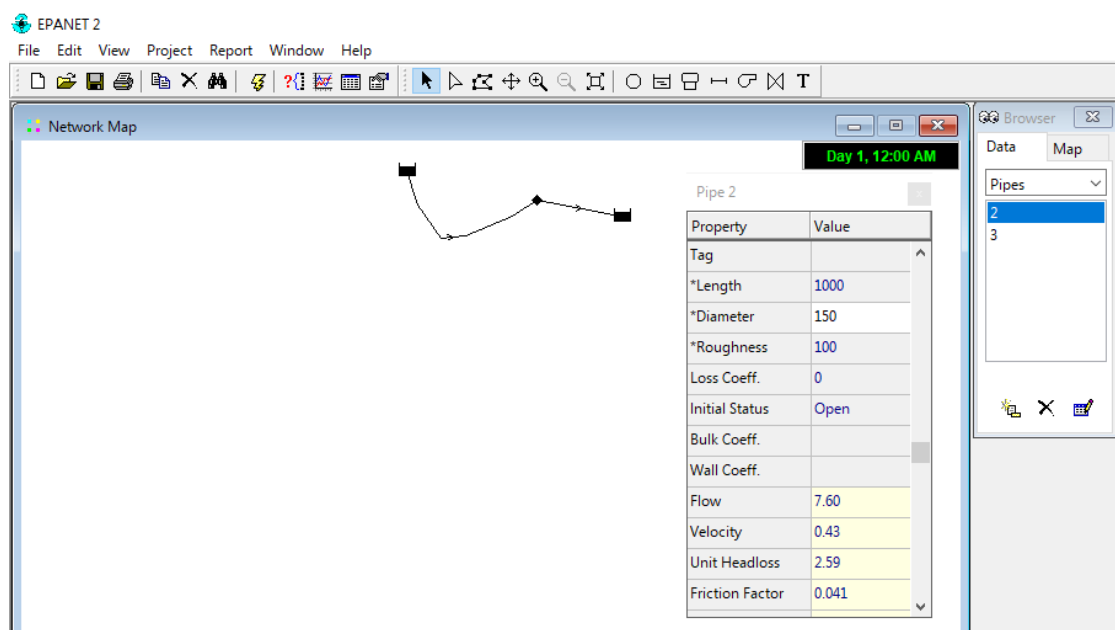
Para traçar uma tubulação, basta clicar no ícone  e direcionar a seta do mouse até um nó específico e depois a um segundo nó, no qual será traçada uma reta entre eles.

Se por uma dada razão o leitor desejar traçar um trecho curvo de tubulação, basta clicar sobre o primeiro nó e, com o apontador do mouse ir clicando sobre a tela até o segundo ponto. Nesse caso o EPANET representa um trecho curvo entre os dois pontos.

Vale mencionar que, embora possa parecer visualmente à existência de pontos de máximo ou de mínimo, o leitor deverá observar que as pressões são calculadas apenas nos nós e as perdas de carga são consideradas ao longo da tubulação. Assim, se o leitor desejar determinar a pressão, por exemplo, em um ponto baixo de uma curva, ele deverá prever ali um nó. Ao clicar duas vezes, com o apontador do *mouse*, sobre um determinado trecho de tubulação, será apresentado um quadro com as características específicas daquele trecho de tubulação, semelhante ao mostrado na

Figura 8.

Figura 8: Apresentação das características específicas de um trecho de tubulação (**Pipe**) selecionado.



Fonte: O autor

No quadro de características específicas no trecho são apresentados o número do trecho (ID), nó inicial e final do trecho, diâmetro, comprimento e rugosidade, inicialmente igual aquelas definidas no **Default** do EPANET.

No caso do comprimento da tubulação, caso a função “autocomprimento” esteja desativada **Auto-Length Off**, surgirá o comprimento estabelecido no **Default**, caso contrário, o EPANET calculará automaticamente a distância entre os dois nós.

Vale mencionar que é possível alterar manualmente qualquer um dos parâmetros característicos do trecho, como comprimento, diâmetro, rugosidade, etc.

No caso do diâmetro, deve-se sempre utilizar o diâmetro interno da tubulação e não, necessariamente, o diâmetro nominal (DN). Veja na seção 3.1.1 os diâmetros internos de algumas tubulações empregadas nos sistemas de abastecimento de água.

O coeficiente de rugosidade da tubulação depende, não só do material da tubulação assim como da idade e características da água e é estabelecido no **Default** aba **Properts** do EPANET. Na seção 3.1.2 serão apresentados alguns coeficientes de perda de carga distribuída (**Pipe Rougness.**) empregados conforme a equação de perda de carga escolhida.

O termo Coeficiente de Perda de Carga (**Loss Coeff.**) constante das características específicas de um determinado trecho de tubulação, refere-se ao coeficiente K de perda de carga localizada, estabelecida pela **Equação 02**, nesse trecho:

$$hf_{loc} = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (02)$$

Onde: **V** é a velocidade média de escoamento (unidade de velocidade); **g** é a aceleração devido à gravidade (unidade de aceleração) e **K** é o coeficiente de perda de carga localizada.

A **Tabela 1** apresenta os valores de **K** empregados em alguns acessórios específicos que causam a perda de carga localizada.

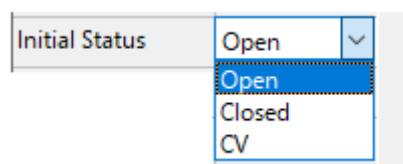
Tabela 1: Coeficiente de perda de carga (K) para alguns acessórios.

Acessório	Coeficiente de Perda de Carga – <i>K</i> (adimensional)
Válvula globo, totalmente aberta	10,0
Válvula de pé com crivo	10,0
Válvula ângulo, aberta	5,0
Válvula de gaveta, aberta	0,2
Válvula de retenção, tipo portinhola	3,0
Válvula de boia	6,0
Cotovelo de 90°, raio curto	0,9
Cotovelo de 90°, raio longo	0,6
Curva 90°, $r/D=1$	0,4
Curva de 45°	0,2

Fonte: Porto (1998).

No caso de haver mais de um acessório em um determinado trecho, o coeficiente de perda de carga (**Loss Coeff.**) representará a somatória dos coeficientes *K* de cada acessório.

Por fim, chama-se a atenção para a característica condição inicial (**inicial status**), conforme apresentado na **Figura 9**.

Figura 9: Opções fornecidas pelo EPANET para a condição inicial (**Initial Status**) de um trecho da tubulação.

Fonte: O autor

Normalmente o EPANET informa que a tubulação está aberta (**Open**). Porém é possível considerá-la fechada (**Closed**), o que equivale a um registro de gaveta fechado localizado ao montante do trecho, ou ainda a opção de condição de **Válvula de Controle (VC)**, que bloqueia o sentido de escoamento, semelhante a uma válvula de retenção.

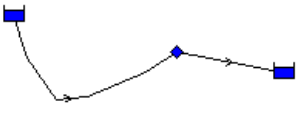
2.2.1.3 Reservatório de nível constante (*reservoir*)

Um reservatório de nível constante (**Reservoir**) pode ser entendido, no EPANET, como um reservatório de grande capacidade que a demanda por água não provoca diminuição considerável em seu nível, como também pode ser entendido como um manancial, superficial ou subterrâneo.

Dessa maneira e com raras exceções, pode-se dizer que em todo o projeto do EPANET haverá um reservatório de nível constante.

Ao clicar duas vezes com a ponta do mouse sobre um reservatório de nível constante (**Reservoir**) surgirá uma tabela com suas características específicas, conforme apresentado na **Figura 10**.

Figura 10: Apresentação das características específicas de um reservatório de nível constante (**Reservoir**) selecionado.



The diagram shows a network of pipes and nodes. A blue square node, representing a reservoir, is highlighted with a red circle. A line connects this node to another node in the network.

Property	Value
*Reservoir ID	2
X-Coordinate	523.56
Y-Coordinate	7611.26
Description	
Tag	
*Total Head	100
Head Pattern	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	-15.27
Elevation	100.00
Pressure	0.00

Fonte: o autor

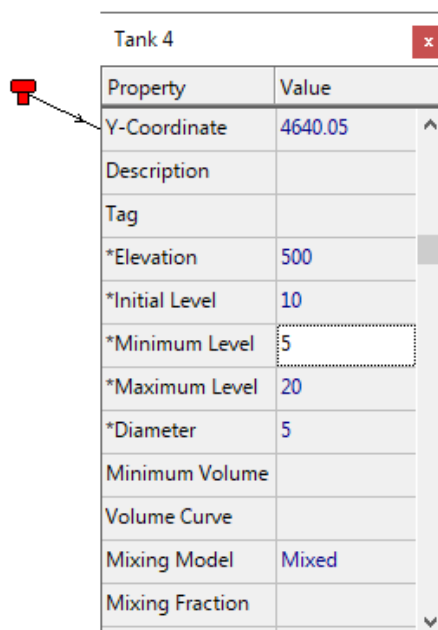
Ao analisar a **Figura 10**, é importante reparar no campo “***Total Head**”, pois ele refere-se à carga hidráulica para o reservatório. Em outras palavras o campo “***Total Head**” refere-se à cota de elevação da linha piezométrica do sistema, que é a cota do próprio nível d’água constante no reservatório.

2.2.1.4 Reservatório de nível variável (**Tank**)

No EPANET, emprega-se o *reservatório de nível variável* (**Tank**) quando é necessário simular o comportamento da variação do nível d’água em seu interior.

Ao clicar duas vezes com o apontador do mouse sobre um reservatório de nível constante (**Tank**) surgirá uma tabela com suas características específicas, conforme apresentado na **Figura 11**.

Figura 11: Apresentação das características específicas de um reservatório de nível variável (**Tank**) selecionado.



Property	Value
Y-Coordinate	4640.05
Description	
Tag	
*Elevation	500
*Initial Level	10
*Minimum Level	5
*Maximum Level	20
*Diameter	5
Minimum Volume	
Volume Curve	
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	

Fonte: O autor

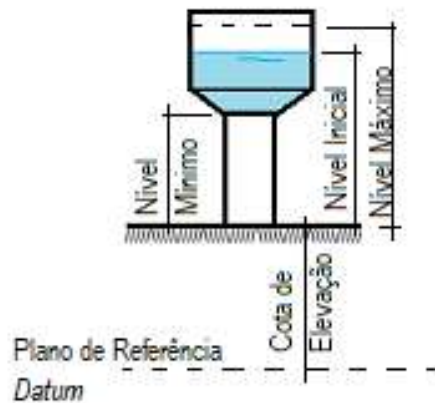
Dentre as características específicas do reservatório de nível variável destaco, inicialmente, a *cota de elevação* (***Elevation**), o *nível inicial* (***Initial Level**), o *nível mínimo* (***Minimum Level**) e o *nível máximo* (***Maximum Level**).

A *cota de elevação* (***Elevation**), refere-se à cota do terreno, onde o reservatório está assentado, relacionado a algum plano de referência, por exemplo, o nível do mar.

Já o *nível inicial* (***Initial Level**), o *nível mínimo* (***Minimum Level**) e o *nível máximo* (***Maximum Level**), referem-se à altura dos níveis d'água a partir da cota de assentamento do reservatório. A

Figura 12 ilustra as cotas de elevação e os desníveis existentes para os níveis d'água necessários para caracterizar um reservatório de nível variável.

Figura 12: Referências para caracterização de um reservatório de nível variável.



Fonte: O autor

De maneira geral, podemos dizer que $\text{nível mínimo} \leq \text{nível inicial} \leq \text{nível máximo}$.

O parâmetro Diâmetro (***Diameter**) apresentado na tabela de características específicas (ver **Figura 11**) refere-se ao diâmetro (em planta) do reservatório sendo, portanto, considerado um cilindro.

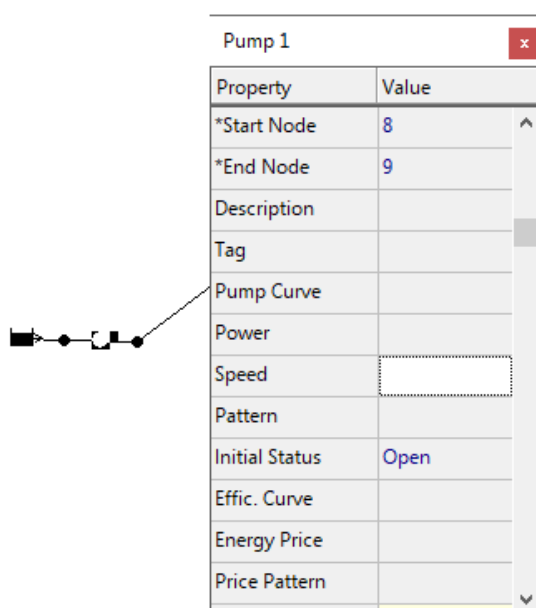
Porém, caso o reservatório possua uma forma variável (reservatório esférico, por exemplo) é possível definir a variação do volume armazenado pela altura d'água. Nesse caso, será necessário estabelecer uma curva de altura x volume, o que constitui uma *componente não física* e que será apresentada mais adiante.

2.2.1.5 Componente bomba (pump)

Para inserir uma bomba hidráulica, ela deve estar entre dois nós (**Junction**). Ao selecionar a componente bomba (**pump**) deve-se primeiro clicar no nó (**Junction**) de montante e depois no nó de jusante.

Ao clicar duas vezes com o ponteiro do mouse sobre o ícone da componente bomba (**pump**), aparecerá a tela com as suas características específicas, conforme apresentado na **Figura 13**:

Figura 13: Apresentação das características específicas de uma bomba (**pump**).



Fonte: O autor

Para a componente bomba (**Pump**) faz-se necessário estabelecer a curva característica da bomba (**Pump Curve**) que é uma *componente não física*.

De maneira semelhante, se a intenção for analisar o consumo de energia, por exemplo, faz-se necessário estabelecer também a *curva de eficiência (Eff. Curve)*, que também é uma *componente não física*, para a curva da bomba estabelecida.

Situação semelhante ocorre para a inserção das curvas para o *preço da energia (Energy Price)* ou *preço padrão (Price Pattern)*.

A curva característica de uma bomba é determinada por um conjunto de pontos Q-vazão e H-altura de elevação, referentes a uma determinada rotação e diâmetro de rotor.

Assim, ao se definir a componente não física constituída por uma curva de bomba estará associada a ela o diâmetro do rotor e a rotação.

Ao se definir a velocidade específica da bomba (**Speed**) ela está relacionada à rotação original para a qual a curva da bomba foi estabelecida. Assim, ao se trabalhar com bombas de rotação variável, o EPANET trabalhará com as relações de equivalência, expressa pelas **Equações 03 e 04:**

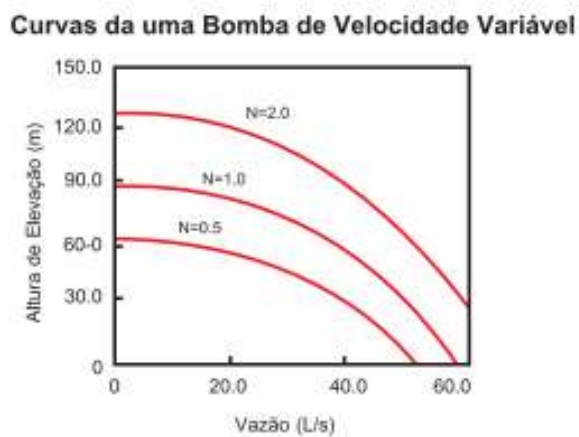
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{RPM_1}{RPM_2} \quad (03)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{RPM_1}{RPM_2} \right)^2 \quad (04)$$

Onde: Q_1 é a vazão para a rotação RPM_1 ; Q_2 é a vazão estabelecida para a rotação RPM_2 ; H_1 altura de elevação obtida para Q_1 na rotação RPM_1 ; H_2 a altura de elevação obtida para a vazão Q_2 estabelecida para a rotação RPM_2 .

Assim, ao se varia a velocidade específica da bomba (**Speed**), ajusta-se a componente não física referente à curva da bomba, conforme mostrado da **Figura 14**.

Figura 14: Correção da componente não física Curva da Bomba a partir da variação da rotação da bomba (**Speed**).



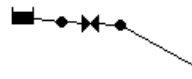
Fonte: o autor

2.2.1.6 Componente válvulas (valve)

As válvulas (**Valve**), assim como as bombas, devem ser aplicadas entre dois nós (**Junctions**).

Ao clicar duas vezes sobre uma válvula, constante de um projeto, aparece uma tabela com suas características específicas, conforme apresentado na **Figura 15**.

Figura 15: Apresentação das características específicas de uma válvula (**Valve**).



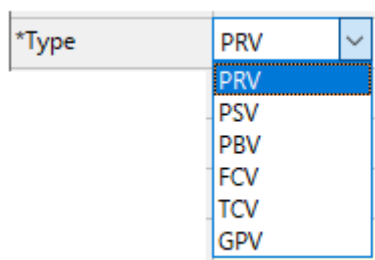
Property	Value
*Valve ID	3
*Start Node	2
*End Node	3
Description	
Tag	
*Diameter	12
*Type	PRV
*Setting	0
Loss Coeff.	0
Fixed Status	None
Flow	#N/A
Velocity	#N/A

Fonte: o autor

Dentre as características específicas de uma válvula, destacam-se: o diâmetro (***Diameter**), tipo da válvula (***Type**), coeficiente de perda de carga localizada (**Loss Coef**), Estado Fixo (**Fixed Status**) e valor padrão fixado (***Setting**).

Ao selecionar o tipo de válvula (***Type**), o EPANET apresenta seis tipos de válvulas: **PRV**, **PSV**, **PBV**, **FCV**, **TCV** e **GPV**, conforme apresentado na **Figura 16**:

Figura 16: Opções fornecidas pelo EPANET para os tipos de válvula.



Fonte: O autor

Antes, porém, de apresentar os tipos de válvulas disponíveis pelo EPANET, para simulação, é importante atentar para o parâmetro ***Setting** da tabela de características específicas das válvulas.

Para cada tipo de válvula, a componente ***Setting** possui um significado, conforme apresentado na **Tabela 2**.

Tabela 2: Significado do parâmetro *Setting em função do tipo de válvula escolhida.

Tipo de Válvula	Significado do parâmetro *Setting
PRV – Válvula Redutora de Pressão	Limite máximo de pressão a jusante da válvula
PSV – Válvula Sustentadora de Pressão	Limite máximo de pressão a montante da válvula
PBV – Válvula de Quebra de Pressão	Diferença de pressão entre montante e jusante da válvula
FCV – Válvula de Controle de Vazão	Valor máximo de vazão através da válvula
TCV – Válvula de Controle de Perda de Carga Fixa	Coeficiente de perda de carga localizada (K)
GPV – Válvula Genérica	Número da curva (componente não físico) que descreve a perda de carga em função da vazão

Fonte: O autor

As instruções de controle das válvulas podem ser anuladas se for especificado na propriedade Estado Fixo (**Fixed Status**) que está aberta (**Open**) ou fechada (**Closed**).

Para que a válvula opere conforme o parâmetro padrão (***Setting**) definido ela precisa ter seu Estado Fixo (**Fixed Status**) em **none**.

O estado da válvula e as respectivas condições de operação podem ser alterados durante a simulação utilizando a opção Controles.

Devido ao modo como as válvulas são modeladas, deve ter-se atenção às seguintes regras, quando se insere novas válvulas na rede:

- Uma **PRV**, **PSV** ou **FCV** não pode ser ligada diretamente a um reservatório de nível fixo ou a um reservatório de nível variável (utilize sempre uma determinada extensão de tubulação para separar os dois componentes);
- Duas **PRV**'s não podem partilhar a mesma tubulação de jusante nem podem estar ligadas em série;
- Duas **PSV**'s não podem partilhar a mesma tubulação de montante nem podem estar ligadas em série;
- Uma **PSV** não pode ser ligada ao nó de jusante de uma **PRV**.

Apresentadas algumas das características e condicionantes de uso para cada um dos tipos de válvulas, empregadas pelo EPANET, serão apresentadas, formalmente, cada uma delas:

- **Válvula Redutora de Pressão – Pressure Reducing Valve (PRV):**

As Válvulas Redutoras de Pressão (**PRV**) limitam a pressão de saída na válvula, instalada em um determinado ponto da rede.

Neste caso, o campo *valor padrão (*Setting)*, da tabela de características específicas da válvula (ver **Figura 15**), estabelece o valor limite para a pressão. Assim, o EPANET simula as seguintes situações de funcionamento para este tipo de válvula: a) Caso a pressão a montante

da válvula seja superior ao estabelecido em ***Setting**, a válvula estará parcialmente aberta, regulando a pressão na saída da válvula; b) caso a pressão de montante da válvula seja menor que o valor estabelecido em ***Setting**, a válvula estará completamente aberta; c) caso a pressão de jusante da válvula seja superior ao valor estabelecido em ***Setting** e/ou a pressão a montante a válvula, esta permanecerá fechada, impedindo que o sentido de escoamento se inverta, funcionando, neste caso, como uma válvula de retenção.

- **Válvula Sustentadora de Pressão - *Pressure Sustaining Valve (PSV)*:**

As Válvulas Sustentadoras de Pressão (**PSV**) limitam a pressão de entrada na válvula, instalada em um determinado ponto da rede.

Neste caso, o campo valor padrão (***Setting**), da tabela de características específicas da válvula (ver **Figura 15**), estabelece o valor limite de pressão que deve se manter a montante da válvula. Assim, o EPANET mantém o valor da pressão de entrada na válvula simulando as seguintes situações: a) Parcialmente aberta, para que a pressão a montante seja igual a um valor pré-definido (***Setting**), quando a pressão a jusante está abaixo deste valor; b) Completamente aberta, se a pressão a jusante é superior ao valor pré-definido (***Setting**); c) Fechada, se a pressão a jusante excede a pressão de montante, não permitindo que o sentido do escoamento inverta, funcionando, neste caso, como uma válvula de retenção.

- **Válvula de Quebra de Pressão – *Pressure Breaker Valve (PBV)*:**

As válvulas de *Quebra de Pressão* provocam uma diferença de pressão entre montante e jusante, cujo valor da perda de carga está estabelecido em ***Setting**. O escoamento através da válvula poderá ocorrer em qualquer sentido. Este tipo de válvula não necessariamente constitui um componente físico da rede, no entanto pode ser utilizado para modelar situações em que existe uma perda de carga fixa que é conhecida, como por exemplo, um registro de gaveta parcialmente fechado, uma placa com orifício, etc.

- **Válvula de Controle de Vazão – *Flow Control Valve (FCV)*:**

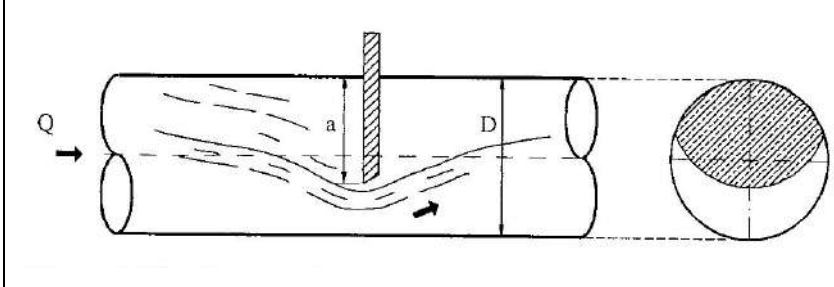
Como o próprio nome já indica, as válvulas de controle de vazão limitam o valor da vazão que passa por ela. O valor limite da vazão fica estabelecido em ***Setting**. O EPANET emitirá uma mensagem de advertência, caso a vazão não possa ser mantida sem que haja um aumento da carga hidráulica na válvula, isto é, mesmo quando a vazão não pode ser mantida com a válvula completamente aberta.

- **Válvula de controle de perda de carga fixa – *Throttle Control Valve (TCV)*:**

As **TCV's** simulam válvulas parcialmente fechadas, ajustando o coeficiente de perda de carga singular da válvula. O parâmetro ***Setting**, apresentado na tabela das características específicas da válvula (ver Figura 15), contém o coeficiente de perda de carga. A relação entre o grau de fechamento da válvula e o correspondente coeficiente de perda de carga singular é fornecida usualmente pelo fabricante da válvula.

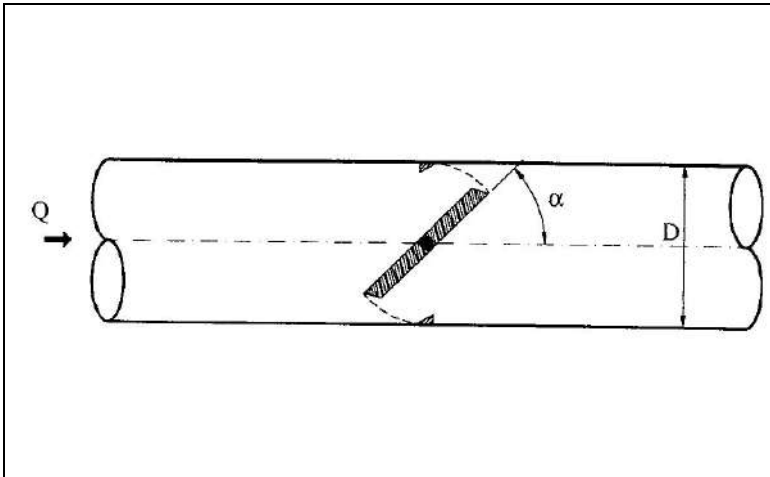
A **Tabela 3** e **Tabela 4**, apresentam alguns dos valores do coeficiente de perda de carga (**K**) que podem ser empregados nas **TCV's**.

Tabela 3: Coeficientes de perda de carga localizada (**K**) para registros de gaveta parcialmente abertos, para serem empregados no parâmetro ***Setting** ao se utilizar Válvula de Controle de perda de carga fixa (**TCV**).

	a/D	K
	0	0,15
	¼	0,26
	3/8	0,81
	½	2,06
	5/8	5,52
	¾	17,00
	7/8	97,8

Fonte: Porto (1998).

Tabela 4: Coeficientes de perda de carga localizada (**K**) para válvula borboleta parcialmente aberta, para serem empregados no parâmetro ***Setting** ao se utilizar Válvula de Controle de perda de carga fixa (**TCV**).

	α (graus)	K
	0	0,15
	5	0,24
	10	0,52
	15	0,90
	20	1,54
	25	2,51
	30	3,91
	35	6,22
	40	10,8
	45	18,7
	50	32,6

Fonte: Porto (1998).

- **Válvula Genérica – General Purpose Valve (GPV):**

As válvulas genéricas – GPV são utilizadas para representar um dispositivo com uma lei de escoamento especial, diferente das expressões utilizadas para os restantes elementos já apresentados. Este tipo de válvula depende de uma **Componente Não Físico**, no caso uma curva, que descreva a perda de carga em função da vazão.

Neste caso, o parâmetro ***Setting** apresentado na tabela de características específicas das válvulas (ver **Figura 15**), corresponde ao número da curva específica para a válvula.

- **Válvula de Retenção ou de Seccionamento – Check Valve (CV):**

As Válvulas de Retenção ou Seccionamento (CV), não são consideradas, pelo EPANET, como elementos separados das tubulações, mas sim como uma propriedade da tubulação onde se localizam.

Embora elas não estejam apresentadas no parâmetro ***Type** (ver **Figura 15**) elas podem ser selecionadas alterando-se a condição inicial (**Initial Conditions**) da própria tubulação, conforme mencionado anteriormente.

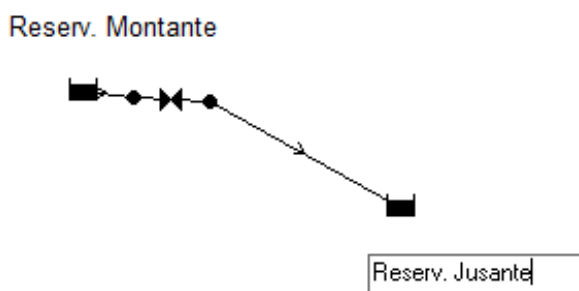
2.2.1.7 Etiqueta (Label) T

Embora não seja propriamente um componente topológico do sistema de abastecimento, a Etiqueta (**Label**) foi aqui apresentada como Componente Físico simplesmente por encontrar-se junto aos demais componentes constantes do EPANET.

A etiqueta tem por finalidade permitir que se escreva na tela do EPANET alguma identificação de um componente físico, conforme apresentado na

Figura 17:

Figura 17: Utilização da componente Etiqueta (**Label**).

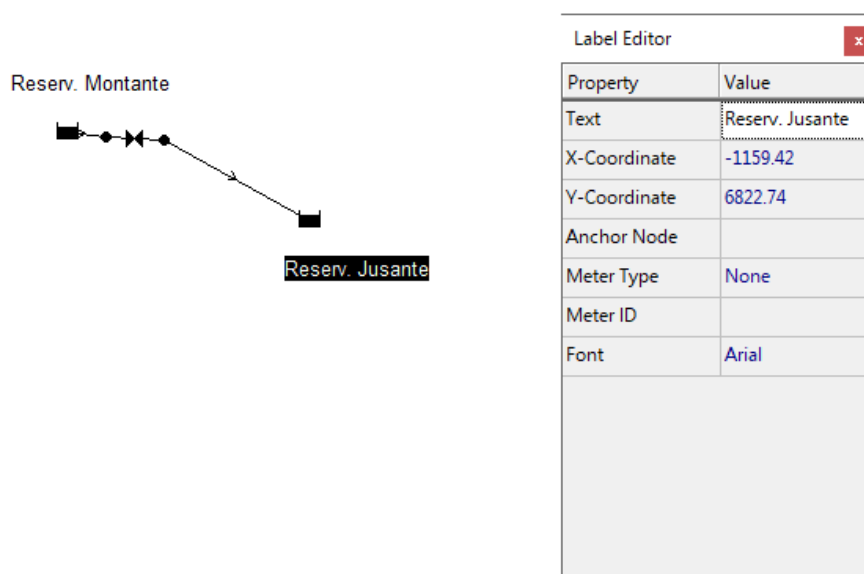


Fonte: O autor

Para alterar a fonte, posição do texto ou o próprio texto contido na Etiqueta, basta clicar duas vezes com o ponteiro do mouse sobre o texto e será apresentado o Editor de Etiqueta (**Label Editor**), conforme apresentado na

Figura 18:

Figura 18: Editando uma Etiqueta (*Label*).



Fonte: O autor

2.2.2 Componentes Não Físicos

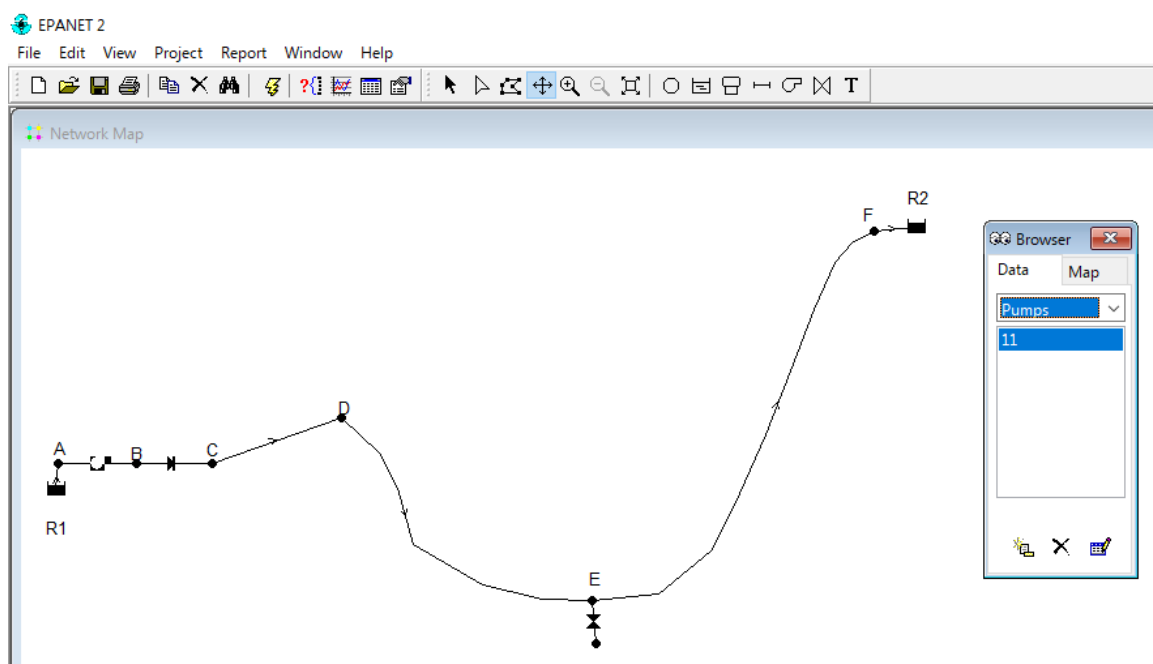
Os componentes não físicos são empregados, pelo EPANET, para descrever alguma característica geométrica específica, funcionamento ou operação, seja de um componente físico ou do próprio sistema de abastecimento, adicionalmente aos componentes físicos.

O EPANET permite definir três categorias de informação sobre *Componentes Não Físicos*: curvas, padrões e controles, que descrevem o comportamento e os aspectos operacionais de um sistema de distribuição de água.

O visualizador (**Browser**) do EPANET, normalmente localizado no canto superior direito (ver **Figura 19**), sempre apresenta a relação de componentes (físicos e não físicos), quando disposto na aba **Data**.

A **Figura 19** ilustra o *visualizador (Browser)*, em destaque, com a relação de bombas existentes. No caso apresentado, o projeto contém apenas uma bomba, cuja identificação é ID 11.

Figura 19: Relação de um determinado Componente em um projeto do EPANET apresentado no visualizador (**Browser**).



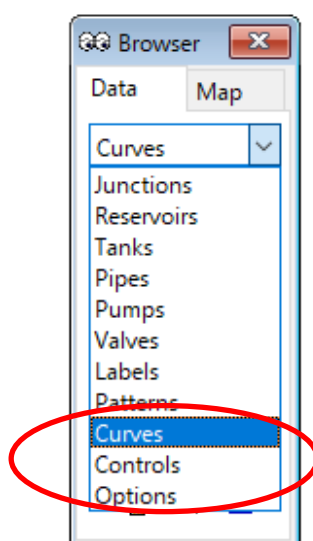
Fonte: O autor

Embora as componentes físicas apareçam automaticamente no visualizador (Browser) é por ele que as Componentes Não Físicas do EPANET serão inseridas manualmente, sejam **curvas**, **padrões** ou **controles**. Para inserir qualquer uma das Componentes Não Físicas: padrão, curva ou controle, basta selecionar o tipo específico apresentado na aba **Data** do visualizador

(**Browser**) e selecionar adicionar  , conforme pode ser visualizado na

Figura 20:

Figura 20: Adicionando uma Componente Não Física ao projeto do EPANET.



Fonte: o autor

2.2.2.1 Curvas (Curves)

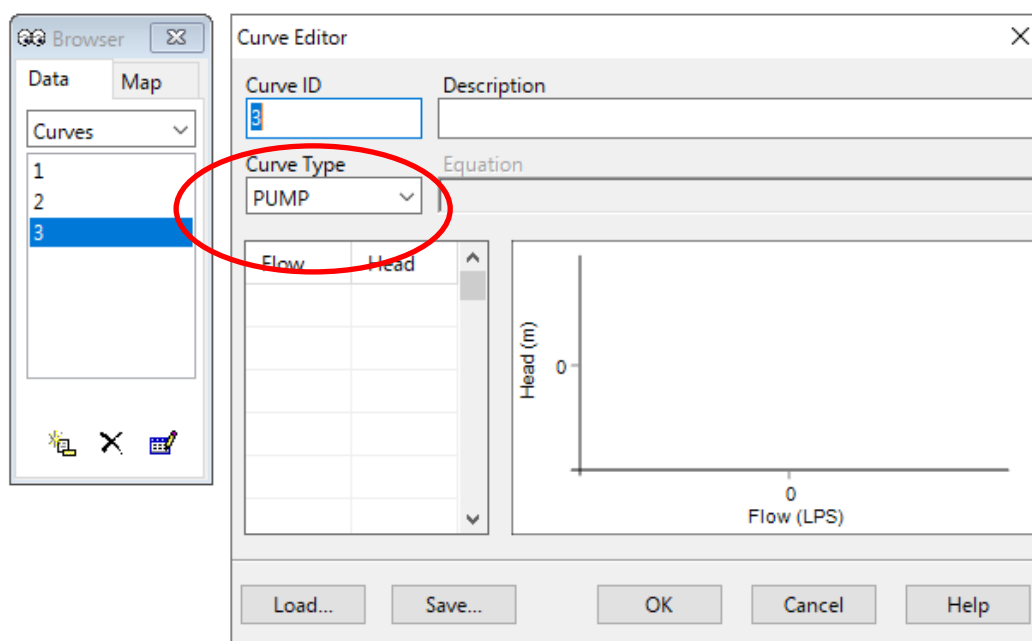
As curvas contêm pares de dados que buscam representar uma relação entre duas grandezas. Dois ou mais componentes podem compartilhar a mesma curva.

Um modelo simulado a partir do EPANET pode utilizar os seguintes tipos de curvas:

- *Curva da Bomba;*
- *Curva de Rendimento;*
- *Curva de Volume;*
- *Curva de Perda de Carga.*

Uma vez selecionado Curvas (**Curves**) no visualizador (**Browser**) do EPANET, surgirá no monitor o Editor de Curvas (**Curve Editor**), conforme apresentado na **Figura 21**.

Figura 21: Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET.



Fonte: O autor

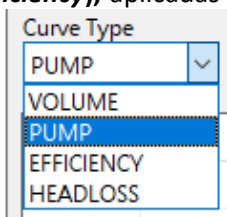
No editor de curvas, é possível o leitor ler um arquivo já gravado com a curva desejada ou então, após a construção da curva, armazená-la para ser usada em projetos futuros.

O arquivo gerado para uma curva, independente do seu tipo, possui extensão **.crv**.

Caso a opção seja construir uma curva no editor de curvas é necessário, primeiro, definir o tipo de curva (**Curve Type**): *Volume (Volume)*, aplicado a reservatórios de nível variável; *Bomba*

(**Pump**) ou *Eficiência* (**Efficiency**), aplicadas as bombas; *Perda de Carga* (**HeadLoss**), aplicado a

válvula genérica (**GPV**).



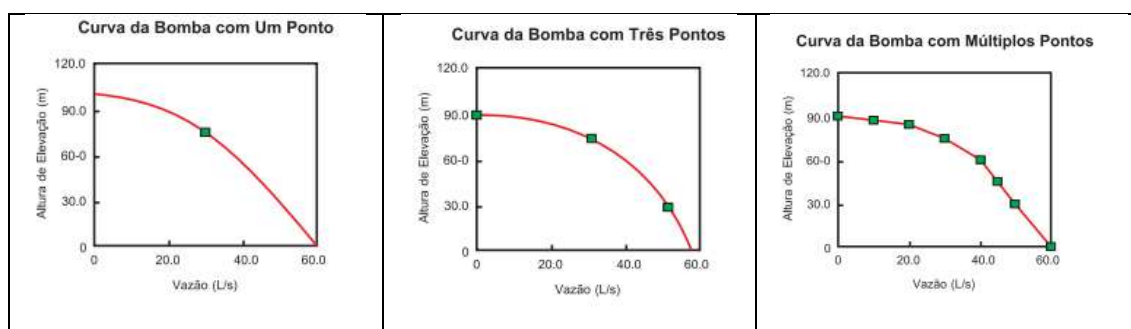
- **Curva da Bomba:**

O EPANET pode definir a curva da bomba de três maneiras:

- Curva com um ponto:** Neste caso basta fornecer um único par de valores de vazão – altura manométrica, referente ao ponto ótimo de funcionamento da bomba. O EPANET adiciona automaticamente dois pontos à curva, estabelecendo que a bomba seja desligada para uma vazão nula, correspondente a uma carga que é 133% da carga nominal e que a vazão máxima, para uma altura manométrica nula, com o dobro da vazão nominal. Deste modo, a curva é traçada como uma curva com três pontos.
- Curva com três pontos:** Neste caso é necessário fornecer três pontos de operação: ponto de Vazão Mínimo (vazão e carga para o ponto de vazão nulo ou mínimo), ponto de Vazão Nominal (vazão e carga para o ponto ótimo de funcionamento), ponto de Vazão Máximo (vazão e a carga para o ponto de vazão máximo). O EPANET ajusta uma função contínua do tipo $H_{elevação} = A - B \cdot Q^c$, onde $H_{elevação}$ é a altura de elevação da bomba, A , B , c são constantes e Q é a vazão bombeada.
- Curva com múltiplos pontos:** Uma curva deste tipo é definida se forem fornecidos quatro ou mais pontos com valores de vazão – altura manométrica. O EPANET cria uma curva completa ligando os vários pontos entre si por segmentos de reta.

A **Figura 22** ilustra os três tipos de construção da curva da bomba.

Figura 22: Tipos de construção de curvas da bomba.



Fonte: O autor

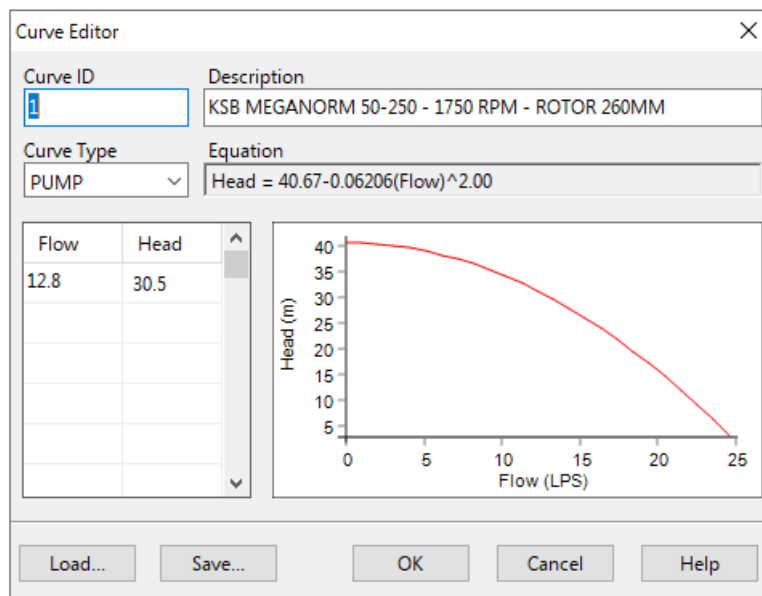
No caso da leitura de uma curva existente, ela aparecerá no Editor de Curvas. Caso opte-se pela construção de uma curva e estando definido que o tipo de curva (**Curve Type**) seja uma

bomba (**Pump**), o leitor escolherá qual dos três métodos empregará para a construção da curva da bomba.

A

Figura 23 ilustra o preenchimento do Editor de Curvas, tendo sido definida a curva empregando-se o ponto vazão-altura de elevação, referenciado ao ponto de máxima eficiência.

Figura 23: Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para Curva da Bomba



Fonte: O autor

Uma vez criada a curva característica da bomba, deve-se associar o ID da curva (Componente Não Físico) à bomba (Componente Físico). Clicando duas vezes com o ponteiro do mouse sobre o desenho da bomba no projeto do EPANET, surgirá o quadro de características no qual deve ser inserido o número ID da curva da bomba, conforme mostrado na **Figura 24**.

Figura 24: Inserção da Curva da Bomba na Tabela das Características Específicas da Bomba.

Property	Value
*Pump ID	11
*Start Node	8
*End Node	9
Description	
Tag	
Pump Curve	1
Power	
Speed	1
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	
Energy Price	

Fonte: O autor

- **Curva de Rendimento da Bomba:**

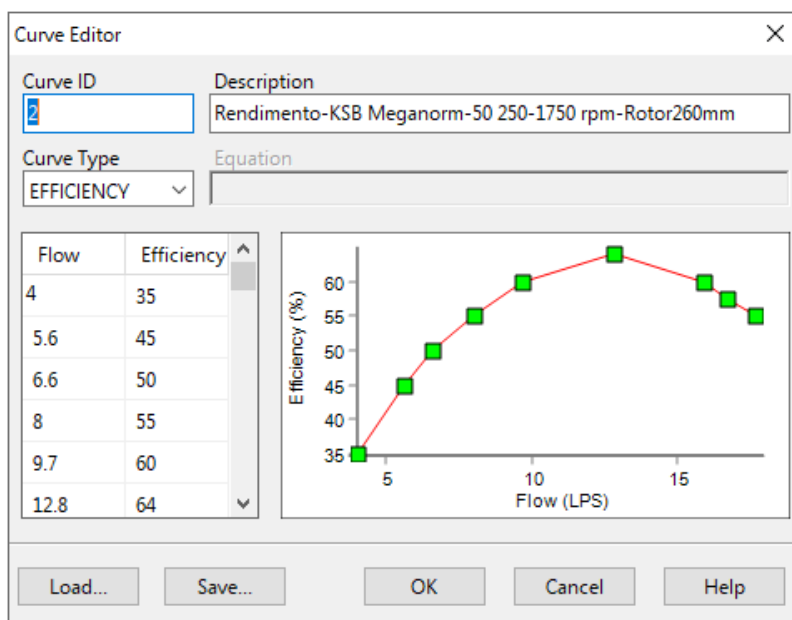
Uma curva de Rendimento da Bomba relaciona a o rendimento do conjunto motor-bomba com a vazão bombeada, conforme expresso pela **Equação 05**:

$$\eta_{conjunto} = \eta_{bomba} \cdot \eta_{motor} \quad (05)$$

Onde: $\eta_{conjunto}$ é a eficiência (%) do conjunto motor-bomba; η_{bomba} é a eficiência da bomba (%); η_{motor} é a eficiência do motor.

A **Figura 25** ilustra o Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para inserção da curva de eficiência.

Figura 25: Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para Curva de Eficiência.



Fonte: O autor

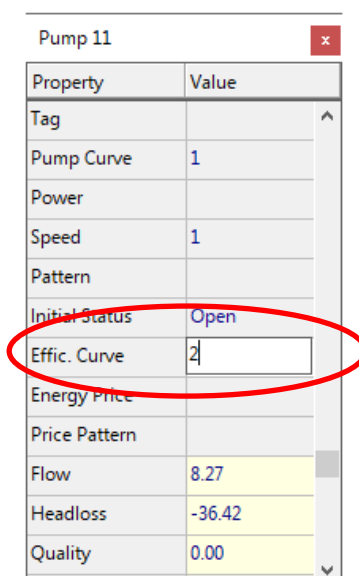
Vale mencionar que a curva de Eficiência é empregada apenas para cálculos energéticos e que a não utilização dessa curva não afeta o comportamento da simulação hidráulica.

Da mesma maneira que a curva da bomba, a curva de Eficiência recebe uma identificação (ID) e pode ser armazenada ou recuperada, empregando-se os comandos **Load** ou **Save** do **Editor de Curvas (Curve Editor)**.

Uma vez que a curva de eficiência seja empregada, deve-se associar o número ID da curva em questão à bomba, complementando a informação no quadro de características da bomba.

Clicando das vezes com o ponteiro do mouse sobre o desenho da bomba no projeto do EPANET, surgirá o quadro de características no qual deve ser inserido o número da curva de eficiência, conforme mostrado na **Figura 26**:

Figura 26: Inserção da Curva de Eficiência na Tabela de Características Específicas da Bomba.



Property	Value
Tag	
Pump Curve	1
Power	
Speed	1
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	2
Energy Price	
Price Pattern	
Flow	8.27
Headloss	-36.42
Quality	0.00

Fonte: O autor

- **Curva de Volume:**

Uma curva de volume descreve como o volume de água armazenado em um reservatório de nível variável varia com a altura de água.

Esse tipo de curva é normalmente utilizado quando se deseja representar, com maior exatidão, o comportamento de reservatórios de nível variável para os quais a respectiva seção transversal varia com a altura.

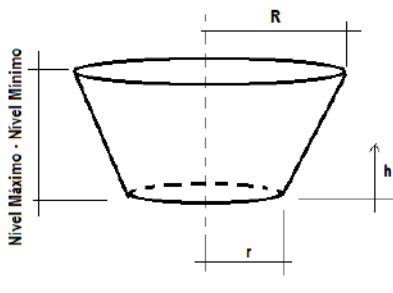
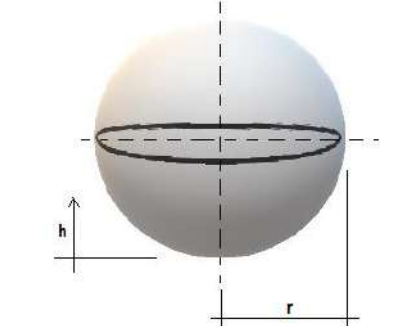
As alturas de água mínima e máxima fornecidas pela curva devem conter os valores mínimos e máximos para os quais o reservatório de nível variável opera.

Normalmente, o EPANET considera constantes os casos em que a seção em planta é constante, ao longo da profundidade útil do reservatório de nível variável, como é o caso de reservatórios cilíndricos, quadrados, triangulares, etc.

No caso dos reservatórios com seção quadrada, triangular, deve-se informar, no campo **Diâmetro (Diameter)** da Tabela de Características Específicas do reservatório de nível variável, o diâmetro cuja área seja equivalente à da figura geométrica constante em planta. Nesses casos, não é necessário criar a curva Volume x Altura d'água.

A **Tabela 5** apresenta alguns tipos de reservatórios cuja seção em planta não é constante ao longo da profundidade útil.

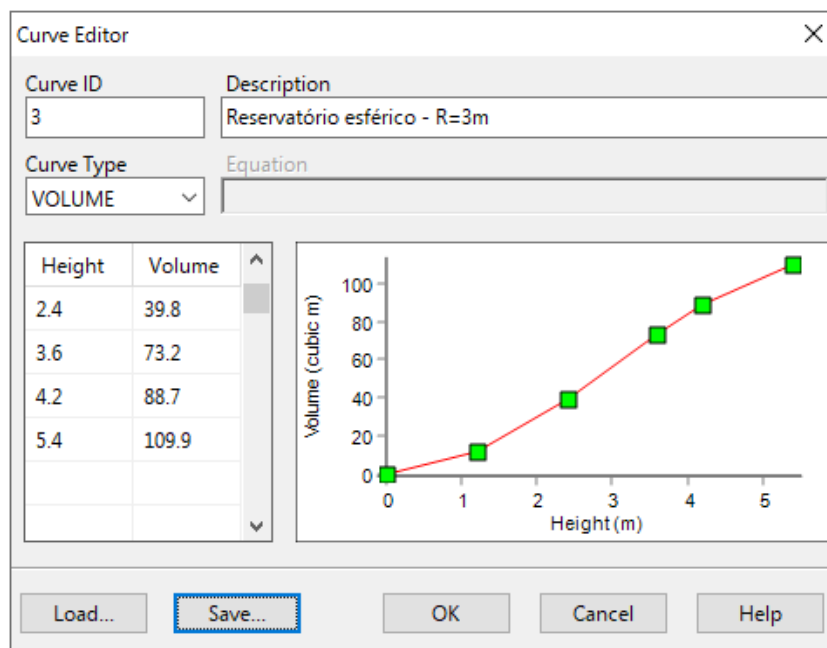
Tabela 5: Fórmulas para o cálculo do volume de reservação a partir da altura da lâmina líquida no interior do reservatório de nível variável.

	$V = \pi \cdot \left[r^2 \cdot h + a \cdot r \cdot h^2 + \frac{a^2}{3} \cdot h^3 \right]$ Com $a = \frac{(R - r)}{(NA_{máximo} - NA_{mínimo})}$
	Para $h \leq r$: $V = \frac{\pi \cdot h}{6} \cdot (6 \cdot r \cdot h - 2 \cdot h^2)$ Para $h > r$ $V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{6} + \frac{\pi \cdot (h - r)}{6} \cdot (4 \cdot r^2 + 4 \cdot r \cdot h - 2 \cdot h^2)$

Fonte: O autor

A **Figura 27** ilustra o Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para inserção da curva de volume para um reservatório de nível variável (**Tank**).

Figura 27: Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para Curva de Volume.



Fonte: O autor

Para associar a curva de volume x altura a um reservatório de nível variável, é necessário inserir o número da curva (ID) na Tabela de Características Específicas do referido reservatório, conforme mostrado na **Figura 28**:

Figura 28: Inserção da Curva de Volume na Tabela de Características Específicas do Reservatório de Nível Variável (*Tank*).

Property	Value
Description	
Tag	
*Elevation	0
*Initial Level	10
*Minimum Level	0
*Maximum Level	20
*Diameter	50
Minimum Volume	
Volume Curve	3
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	
Reaction Coeff.	

Fonte: O autor

- **Curva de Perda de Carga:**

A Curva de Perda de Carga é utilizada para descrever a perda de carga provocada por uma peça em relação à vazão que passa por uma Válvula Genérica (**GPV**).

A

Figura 29 ilustra o Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para inserção da curva de perda de carga para uma *válvula genérica (GPV)*.

Figura 29: Editor de Curvas (**Curve Editor**) do EPANET para Curva de Perda de Carga (**Headloss**).

Curve Editor

Curve ID: 4

Description:

Curve Type: HEADLOSS

Equation:

Flow: Headloss

Headloss (m)

Flow (LPS)

Load... Save... OK Cancel Help

Fonte: O autor

De maneira semelhante como as demais curvas, a curva de perda de carga deve ser associada, neste caso, unicamente a uma válvula genérica (**GPV**), através da Tabela de Características Específicas da válvula.

2.2.2.2 Padrões Temporais (Patterns)

Um Padrão Temporal é constituído por um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, de forma a representar a sua variação no tempo.

O consumo de água aplicado em um nó, a carga hidráulica num reservatório de nível fixo, os esquemas de bombeamento e a entrada de um parâmetro de qualidade da água na rede podem estar associados a um padrão temporal.

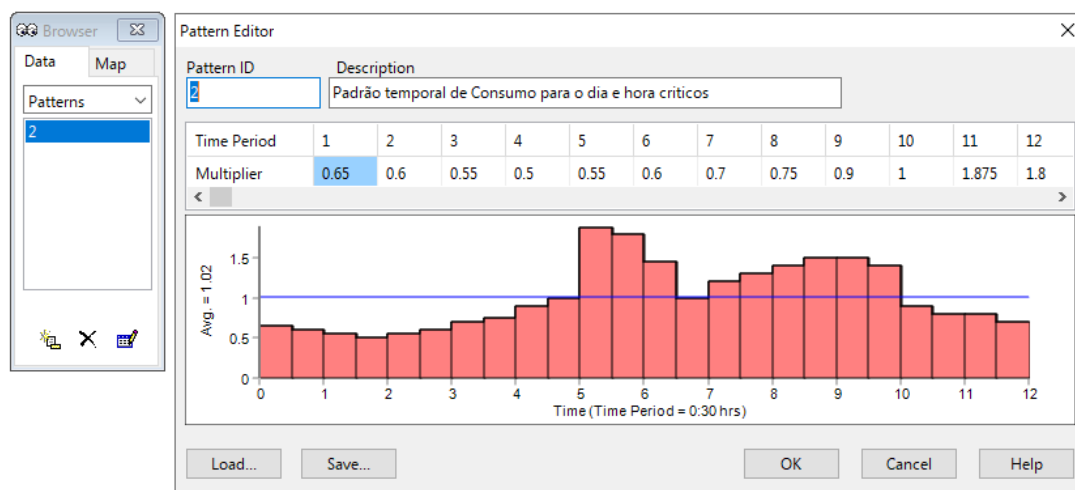
Por exemplo, enquanto o *consumo médio* de água (**Base Demand**) em um determinado nó (**Junction**) é de 2 L/s, o consumo varia ao longo do tempo.

Um padrão de consumo pode ser criado, gravado o lido, caso ele já exista. Os arquivos referentes aos padrões temporais possuem extensão **.pat**.

A emporal.

Figura 30 ilustra a tabela para a criação de um Padrão Temporal.

Figura 30: Fatores multiplicados inseridos no Padrão temporal referente ao consumo de água.



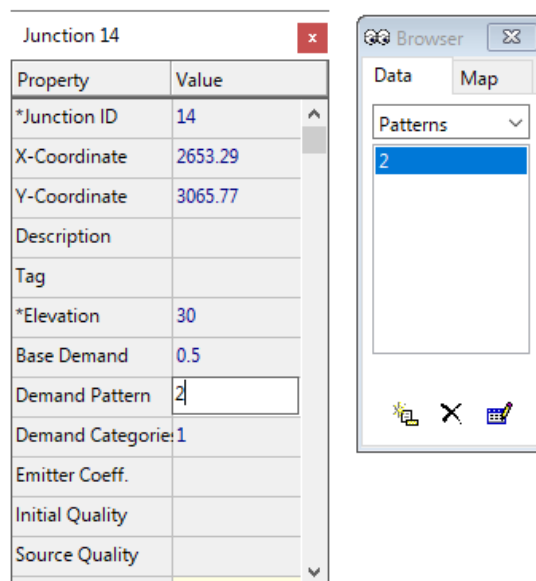
Fonte: O autor

Ao criar um padrão temporal, ele deverá ser associado a um componente físico, indicando o número ID do padrão na tabela de características específicas do componente.

A

Figura 31 ilustra, como exemplo, a associação do padrão temporal de consumo a um determinado nó (*Junction*).

Figura 31: Associação do padrão temporal de consumo a um determinado nó (*Junction*).



Fonte: O autor

O intervalo de tempo padrão utilizado em todos os padrões assume um valor fixo (mesmo que as grandezas sejam diferentes), que é definido a partir do *Visualizador (Browser)*, aba **Data**, *Opções (Options)* >> *Tempo (Time)*.

Para cada intervalo de tempo, o valor da grandeza mantém-se constante, igual ao produto do seu valor nominal pelo fator multiplicativo do padrão respectivo a esse intervalo de tempo.

Embora todos os padrões temporais tenham que utilizar o mesmo intervalo de tempo, cada um pode apresentar um número diferente de intervalos. Quando o tempo de simulação excede o número de intervalos de tempo de um padrão, o padrão temporal é reiniciado.

2.2.2.3 Controles (Controls)

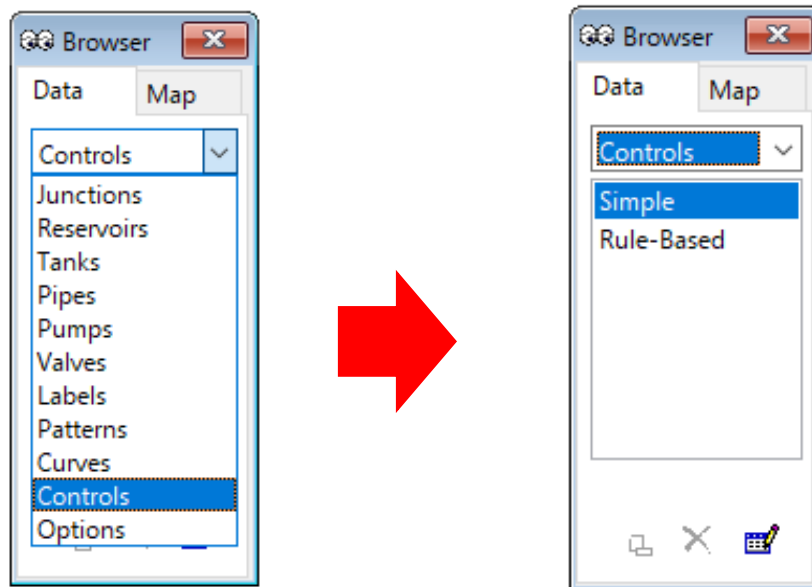
Os Controles formam um conjunto de instruções que estabelecem as condições operacionais do sistema de abastecimento ao longo do tempo.

Os controles especificam o estado dos trechos selecionados em função do tempo, alturas de água num reservatório de nível variável e valores de pressão em pontos específicos da rede.

Existem duas categorias de controles que podem ser utilizadas:

- a) Controles Simples;
- b) Controles Programados ou Condicionais.

Figura 32: Criando os Controles no EPANET.



Fonte: O autor

- **Controles Simples:**

Os controles simples alteram o *estado (Status)* ou as *propriedades* de um *trecho (Link)* com base nos seguintes parâmetros:

- Altura de água num reservatório de nível variável;
- Pressão num nó;
- Instante de simulação;
- Instante do dia.

Ao escolher qualquer a categoria de *controle simples*, abre-se o Editor de Controles Simples, onde são escritas as instruções no seguinte formato:

LINK **x** *status* IF NODE **y** ABOVE/BELOW **z**

LINK **x** *status* AT TIME **t**

LINK **x** *status* AT CLOCKTIME **c** AM/PM

Onde: **x** = Identificador do trecho.

status = ABERTO ou FECHADO. Status pode ser um parâmetro relacionado à regulação da velocidade de rotação de uma bomba ou parâmetro de controle de uma válvula.

y = Identificador do nó.

z = Pressão num nó ou a altura de água num RNV.

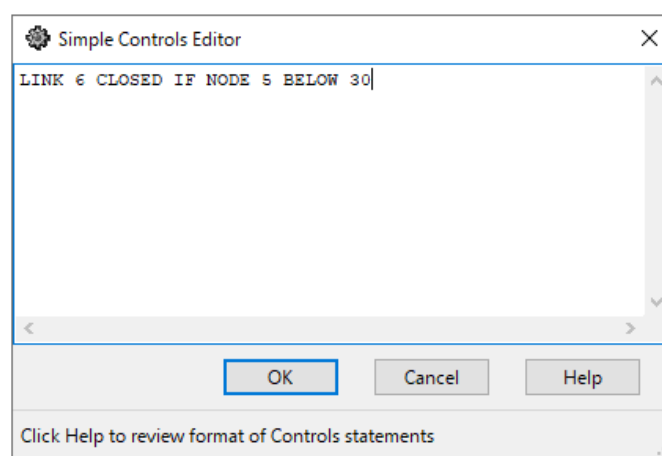
t = Tempo desde o início da simulação em notação decimal ou em horas: minutos.

c = Instante do dia (período de 24 horas).

A

Figura 33 ilustra a descrição de um comando simples no Editor de Comandos Simples:

Figura 33: Editor de Controle Simples.



Fonte: O autor

A regra escrita no *Editor de Controles Simples (Simple Controls Editor)*, apresentado na Figura, estabelece que o trecho (**Link**), cujo ID é 6, será fechado se o nó (**Node**) com ID=5 tiver pressão menor que 30 mH₂O.

- **Controles Programados ou Condicionais:**

Os Controles Programados ou Controles Condicionais permitem que o estado (**Status**) e as propriedades dos trechos dependam da combinação de um conjunto de regras condicionantes que podem ocorrer na rede, após o cálculo das condições hidráulicas iniciais.

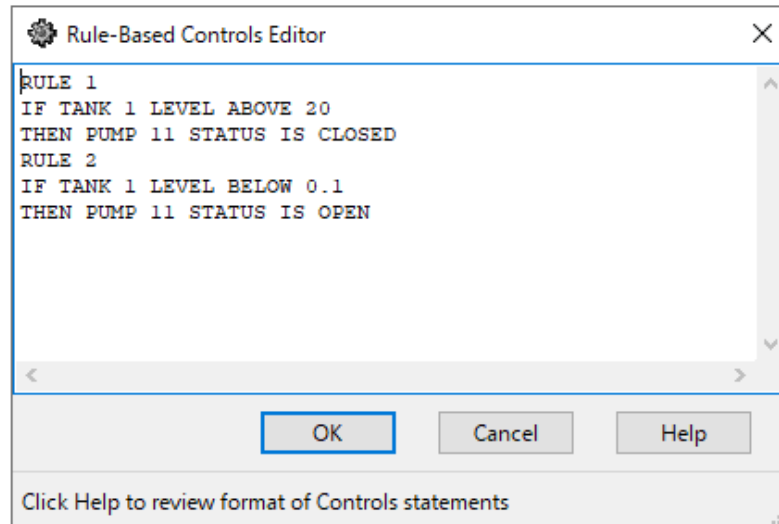
Como exemplo, serão apresentadas, na sequência, algumas regras estabelecidas para os Controles Programados:

Exemplo 1: Uma bomba (**Pump com ID=11**) deve ser ligada quando o nível do reservatório de nível variável (**Tank com ID=1**) atingir o nível mínimo (**Mínimum Level = 0.1**) e desligada quando o nível do reservatório chegar no nível máximo (**Maximum Level = 20**). (Note que são duas

regras (**Rules**) condicionais, uma para verificar o nível máximo e outra para verificar o nível mínimo). A

Figura 34 apresenta as regras para o exemplo 1:

Figura 34: Editor de Controles Programados – Exemplo 1.

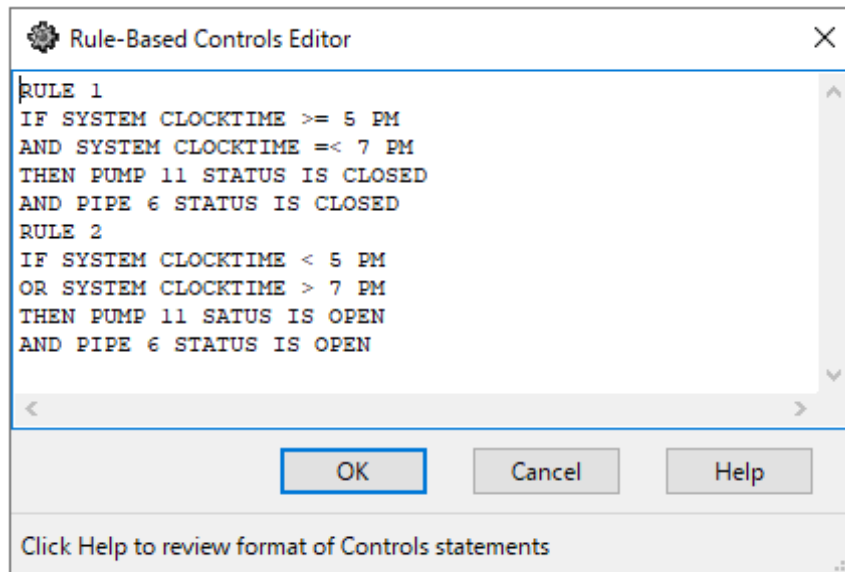


Fonte: O autor

Exemplo 2: Uma bomba (**Pump com ID=11**) deve ser desligada às 17h e religada às 19h. Nesse mesmo período a tubulação de recalque (**PIPE com ID=6**) deve permanecer fechada. (Note que são duas regras (**Rules**) condicionais e para cada regra há dois comandos: desligar a bomba E fechar a tubulação às 17h e ligar a bomba E abrir a tubulação às 19h). A .

Figura 35 apresenta as regras para o exemplo 2.

Figura 35: Editor de Controles Programados – Exemplo 2.



Fonte: O autor

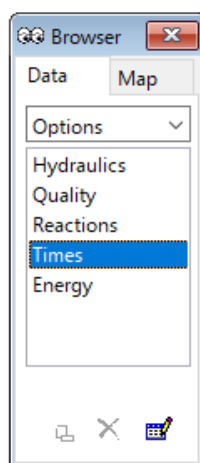
No Apêndice C do **Manual do Usuário do EPANET**, na seção **[Rules]**, há uma explicação detalhada para a construção dos Controles Programados. Não deixe de consultar!

2.2.2.4 Opções (Options)

As Opções (**Options**) constituem-se um conjunto de características para a realização dos cálculos hidráulicos, energéticos, de qualidade ou mesmo para estabelecer os períodos e intervalos de tempo para as simulações.

A **Figura 36** apresenta as características que podem ser especificadas em **Opções (Options)**.

Figura 36: Características que podem ser especificadas em Opções (Options).



Fonte: O autor

Ao selecionar uma das opções, Hidráulica (**Hydraulics**), Qualidade (**Quality**), Reações (**Reactions**) ou Energia (**Energy**) são apresentadas tabelas específicas para a realização da simulação para cada uma delas.

A **Figura 37** ilustra as tabelas específicas apresentadas em **Opções (Options)** para a realização dos cálculos e simulações:

Figura 37: Tabelas específicas apresentadas para as opções de cálculo Hidráulico, de Qualidade, das Reações e de Energia.

Hydraulics Options	
Property	Value
Flow Units	LPS
Headloss Formula	H-W
Specific Gravity	1
Relative Viscosity	1
Maximum Trials	40
Accuracy	0.001
If Unbalanced	Continue
Default Pattern	1
Demand Multiplier	1.0
Emitter Exponent	0.5
Status Report	No
CHECKFREQ	2

a) Opção Hidráulicas

Quality Options	
Property	Value
Parameter	None
Mass Units	mg/L
Relative Diffusivity	1
Trace Node	
Quality Tolerance	0.01

b) Opção Qualidade

Reactions Options	
Property	Value
Bulk Reaction Order	1
Wall Reaction Order	First
Global Bulk Coeff.	0
Global Wall Coeff.	0
Limiting Concentration	0
Wall Coeff. Correlation	0

c) Opção Reações

Energy Options	
Property	Value
Pump Efficiency (%)	75
Energy Price/kwh	0
Price Pattern	
Demand Charge	0

d) Opção Energia

Fonte: O autor

A opção (**Options**) tempo (**Time**) foi propositalmente tratada separadamente das demais, pois ela rege as condições de simulação que as demais opções estarão submetidas.

A .

Figura 38 ilustra as opções de tempo (**Time**) consideradas para as simulações no EPANET.

Figura 38: Opções de tempo consideradas nas simulações.

Times Options	
Property	Hrs:Min
Total Duration	24
Hydraulic Time Step	0:30
Quality Time Step	0:05
Pattern Time Step	0:30
Pattern Start Time	0:00
Reporting Time Step	0:30
Report Start Time	0:00
Clock Start Time	12 am
Statistic	None

Fonte: O autor

Caso a duração total da simulação seja zero, o EPANET faz os cálculos para a condição inicial. É o que se chama de simulação ESTÁTICA.

Muitas vezes, no dimensionamento de partes de um sistema de abastecimento essa situação é suficiente se considerarmos os parâmetros críticos de consumo de água, por exemplo. No entanto, para realizar a análise do comportamento de um sistema, faz-se necessário analisar ao longo de um período.

Assim, para tornar um sistema de abastecimento mais realístico é necessário definir alguns parâmetros:

- Duração total da simulação (**Total Duration**), que determinará o tempo para a simulação de um determinado cenário;
- Hora de início da simulação (**Clock Start Time**), que determina o horário inicial que o EPANET considerará o início da simulação;
- Intervalo de tempo para cada cálculo hidráulico (**Hydraulic Time Step**), que representa o intervalo de tempo entre cada simulação hidráulica;
- Intervalo de tempo para o cálculo da qualidade (**Quality Time Step**), que estabelece o intervalo de tempo para cada cálculo da qualidade de água;
- Intervalo de tempo para um padrão temporal (**Pattern Time Step**);
- A hora de início do padrão temporal (**Pattern Start Time**) que estabelece o horário que referenciará o início do padrão temporal e, por fim,
- A hora inicial (**Report Start Time**) e o intervalo de tempo para cada simulação reportada (**Reporting Time Step**), ou seja, embora os cálculos possam ser feitos com intervalos de tempo de 5 minutos, o EPANET pode informar os resultados a cada 1 hora, por exemplo.

Em suma, é possível obter estatística a partir de valores médios, mínimos ou máximos para os parâmetros considerados.

2.2.3 Mapa Mental das Relações de Dependência entre as Componentes Físicas e Não-Físicas existentes no EPANET

A **Tabela 6** mostra as relações de dependência das componentes físicas e não físicas existentes no EPANET.

Tabela 6: Relações de dependência das componentes físicas e não físicas existentes no EPANET.

Componente Físico	Componente Não Físico	O porquê da dependência.	É necessária a dependência?
 Nó (Node)	 Padrão (Patterns)	Caso queira definir um padrão temporal da variação do consumo.	Depende
 Bomba (Pump)	 Curvas (Curves)	Para bomba: a curva da bomba é obrigatória para descrever a elevação x vazão.	SIM
		A curva da eficiência é obrigatória somente para o caso de analisar o consumo de energia elétrica.	Depende
 Válvulas (Valves)		Para válvula: é obrigatória apenas para a válvula TGV para descrever a perda de carga x vazão	Depende
 Reservatório de Nível Variável – RNV (Tank)		Para RNV : é obrigatória apenas para reservatórios de nível variável (Tank) que possua seção variável. Aplica-se para definir volume x altura d'água	Depende
 Reservatório de Nível Constante – RNC (Reservoir)			NÃO
 Tubulação (Link)			NÃO
 Etiqueta (Label)			NÃO
	Controles (Controls)	É necessário para se impor as condições de operação do sistema em uma simulação temporal	Depende
	Opções (Options)	Hydraulic: é obrigatório para o cálculo hidráulico, tanto para condição estática quanto para análise temporal	Sim
		Times : é necessário para o cálculo das séries temporais, para o caso de simulação temporal.	Depende
		Quality : necessário para o cálculo da qualidade da água	Depende
		Rate : necessário para o cálculo das taxas de reação	Depende
		Energy : necessário para o cálculo do consumo de energia e análises de custo.	Depende

Fonte: O autor

2.3 O visualizador/navegador (Browser)

O visualizador do EPANET (**Browser**), em geral, fica localizado no canto superior direito da tela do EPANET.

Quando inicia um projeto no EPANET sua aparência é semelhante àquela apresentada na **Figura 39**:

Figura 39: Aparência inicial do Visualizador (Browser).



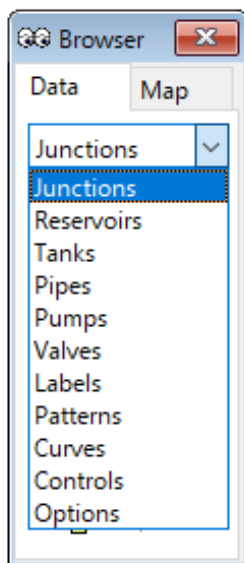
Fonte: O autor

No visualizador há duas abas: **Data** e **Map**, conforme pode ser visualizado na **Figura 39**.

2.3.1 A aba *Data* do *Browser*

Na aba **Data** há um conjunto de componentes (físicos e não físicos) usado pelo EPANET, conforme pode ser visualizado na **Figura 40**:

Figura 40: Componentes físicos e não físicos considerados pelo EPANET.



Fonte: O autor

As componentes consideradas no Visualizador (Browser) são:

Componentes Físicos:

- Nós (**Junctions**)
- Reservatórios de Nível Constante (**Reservoirs**)
- Reservatórios de Nível Variável (**Tanks**)
- Tubulações (**Pipes**)
- Bombas (**Pumps**)
- Válvulas (**Valves**)
- Etiquetas (**Labels**)

Componentes Não Físicos:

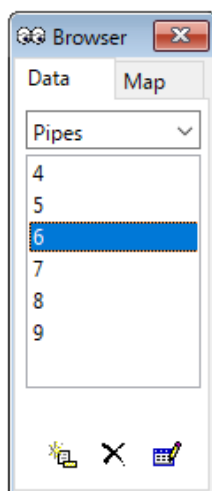
- Padrões (**Patterns**)
- Curvas (**Curves**)
- Controles (**Controls**)
- Opções (**Options**)

Toda vez que um *componente físico* é inserido no projeto, clicando-se sobre o ícone correspondente e inserido na tela do EPANET, automaticamente é inserida sua identificação (ID) e é apresentada no visualizador à relação de componentes do mesmo tipo.

Já as componentes não físicas são inseridas manualmente, clicando-se no ícone , localizado na parte inferior do visualizador. De maneira semelhante é inserida a identificação (ID) da componente não física e é apresentada a relação das componentes não físicas e de mesmo tipo.

A **Figura 41** mostra um exemplo da aparência da aba Data no visualizador quando existe algum componente (físico ou não físico). No caso exemplificado é apresentada a relação de tubulações (**Pipes**) existentes no projeto.

Figura 41: Aparência da aba Data do visualizador (**Browser**) quando há componentes de projeto.

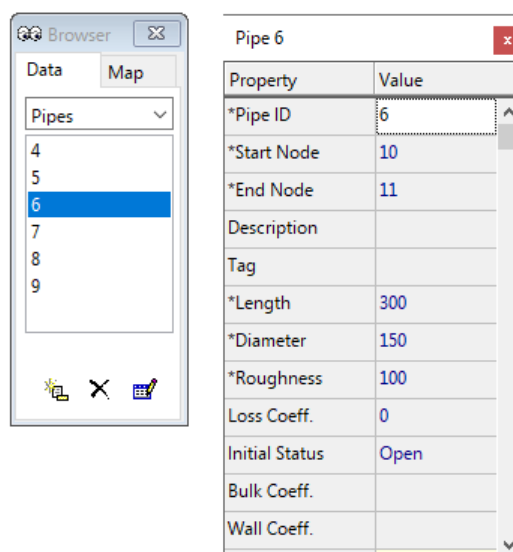


Fonte: O autor

Caso o usuário desejar ver, analisar ou mesmo alterar alguma das propriedades características de qualquer componente, basta clicar sobre o código de identificação (ID) que aparece na listagem apresentada na aba **Data** do *Visualizador (Browser)* da componente selecionada.

Voltando a observar a **Figura 41**, ao se clicar duas vezes sobre a identificação (ID) 6 da componente física *Tubulação (Pipe)* é apresentada a Tabela de características específicas da tubulação selecionada, conforme pode ser observado na **Figura 42**.

Figura 42: Acessando as características específicas de um determinado componente a partir do Visualizador (*Browser*).

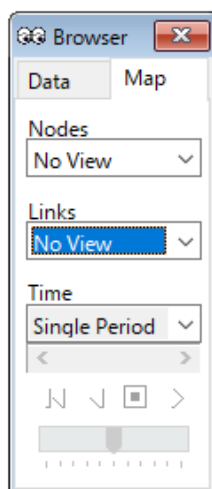


Fonte: O autor

2.3.2 A aba *Map* do *Browser*

Na aba **Map** apresentada no visualizador (*Browser*) é possível visualizar no projeto características físicas ou parâmetros calculados após uma simulação tanto para os nós (Nodes) quanto para os trechos (*Links*) que compõem o projeto e para qualquer tempo calculado na simulação. A **Figura 43** apresenta a aparência da aba **Map**.

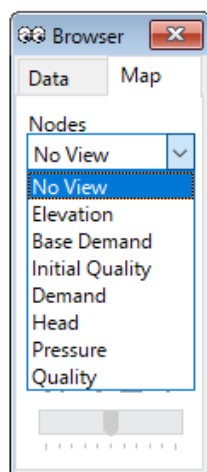
Figura 43: Aparência inicial da aba **Map**.



Fonte: O autor

No caso de a simulação ter sido executada por um determinado período, a opção *Tempo (Time)* é ativada e pode acompanhar as variações das características escolhidas para a componente selecionada. Do contrário, a opção *Tempo (Time)*, permanece desativada, já que os cálculos foram executados para um único tempo.

Figura 44: Possibilidade de visualização de algumas das características para os nós (**Nodes**)



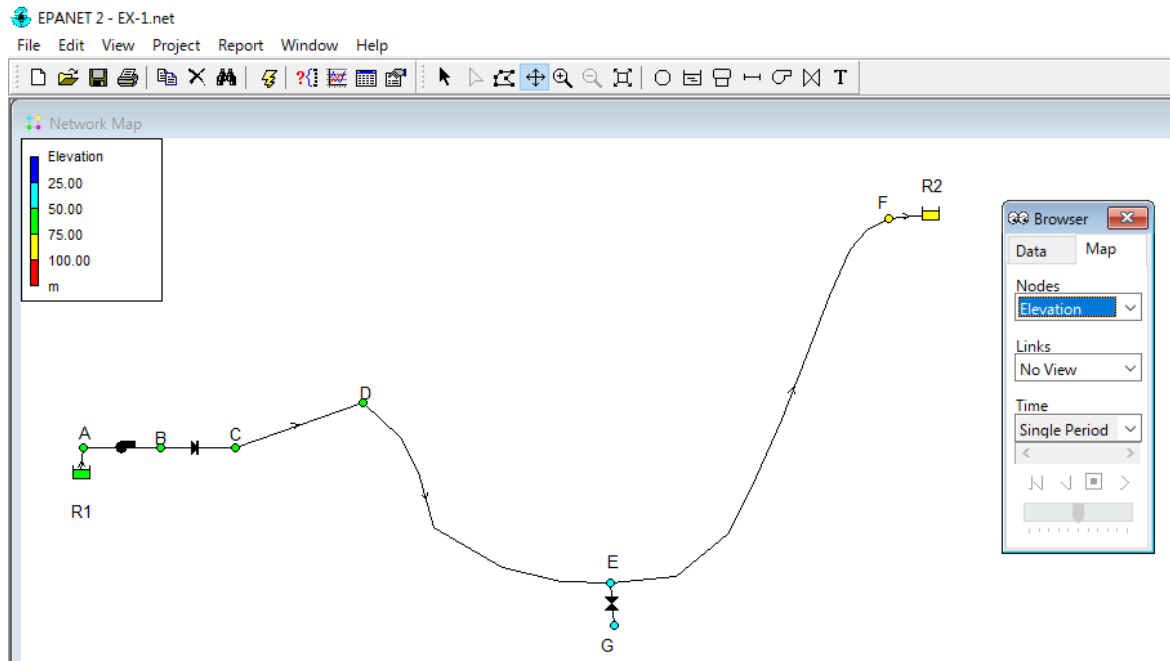
Fonte: O autor

Para os nós (**Nodes**) é possível obter informações sobre:

- Elevação do terreno (**Elevation**)
- Demanda média (**Base Demand**)
- Qualidade Inicial (**Initial Quality**)
- Demanda (**Demand**)
- Cota piezométrica (**Head**)
- Pressão (**Pressure**)
- Qualidade (**Quality**)

Ao selecionar, por exemplo, a opção **Elevation**, os nós do projeto são coloridos de acordo com uma legenda identificando a faixa da cota de elevação que se encontra cada nó. A **Figura 45** ilustra o resultado exemplificado.

Figura 45: Dados sobre as cotas de elevação dos nós apresentados a partir da seleção **Map** do Visualizador.

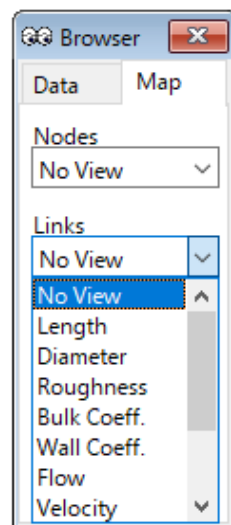


Fonte: O autor

Para o exemplo apresentado, ao analisarmos a **Figura 45**, percebemos que os nós nomeados R1, A, B, C e D estão localizados em cotas que variam de 50 a 75m; os nós E e G em cota entre 25 e 50 m e os nós F e R2 em cotas entre 75 e 100 m.

É importante mencionar que as cores empregadas na legenda, assim como os intervalos considerados podem ser alterados a partir da barra de Menu em **View >>> Legends >>> Modify**.

Figura 46: Possibilidade de visualização de algumas das características para os trechos das tubulações (**Links**).



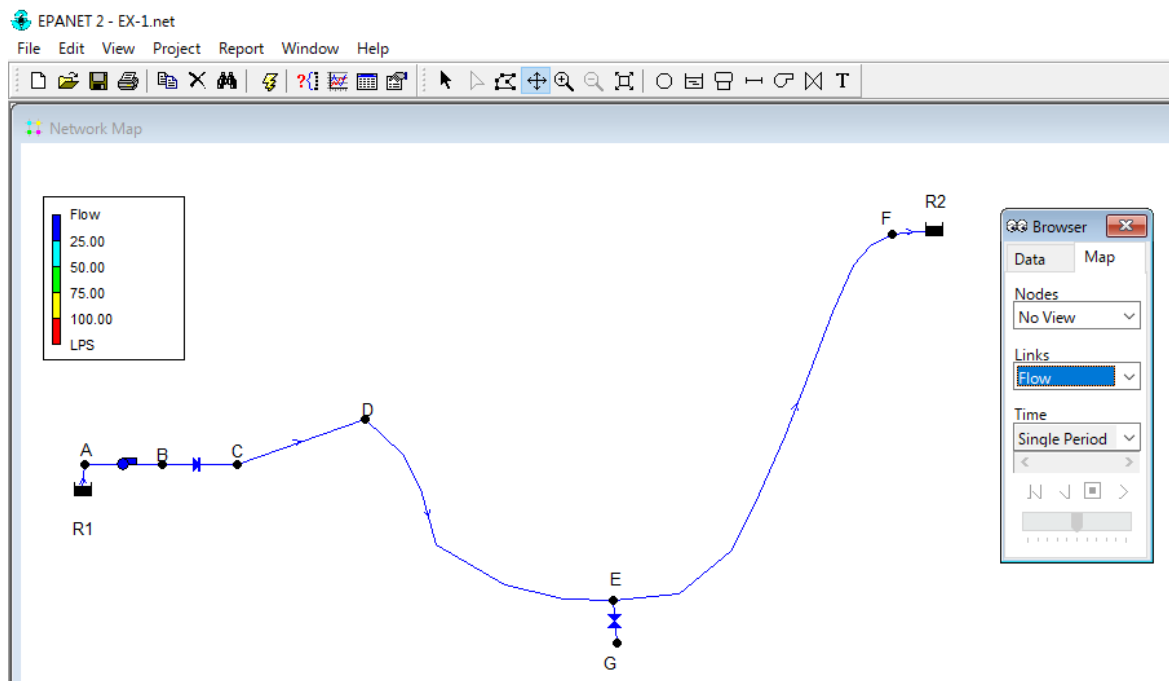
Fonte: O autor

Para os trechos de tubulação (**Links**) é possível obter informações sobre:

- Comprimento (**Length**)
- Diâmetro (**Diameter**)
- Rugosidade (**Roughness**)
- Coeficiente de Bulk (**Bulk Coeff.**)
- Coeficiente de Parede (**Wall Coeff.**)
- Vazão (**Flow**)
- Velocidade (**velocity**)
- Perda de Carga Unitária (**Unit Headloss**)
- Fator de atrito (**Friction Factor**)
- Taxa de reação (**Reaction Rate**)
- Qualidade (**Quality**)

Ao selecionar, por exemplo, a opção **vazão (Flow)**, os trechos de tubulação (**Links**) do projeto são coloridos de acordo com uma legenda identificando a faixa de vazão verificada em cada trecho. A **Figura 47** ilustra o resultado exemplificado:

Figura 47: Dados sobre a vazão calculada para cada trecho apresentada a partir da seleção **Map** do Visualizador.



Fonte: O autor

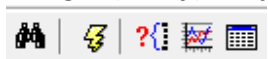
Para o exemplo apresentado, ao analisarmos a **Figura 47** percebemos que todos os trechos possuem vazão entre 0 e 25 L/s.

Conforme mencionado anteriormente, as cores empregadas na legenda, assim como os intervalos considerados podem ser alterados a partir da barra de Menu em **View >>> Legends >>> Modify**.

2.4 Executando e Analisando um projeto

A execução dos cálculos hidráulicos e de qualidade da água, assim como as ferramentas para análise dos resultados das simulações, está disponível a partir dos comandos **Encontrar (Find)**, **Executar (Run)**, **Investigar (Query)**, **Gráficos (Graph)** e **Tabelas (Table)**, localizados logo

baixo da barra de Menu:



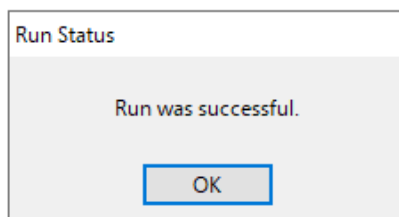
Após a construção de um projeto ou da leitura de um arquivo que contenha um projeto do EPANET, será necessário executar o modelo para os cálculos hidráulicos e de qualidade antes de se analisar os resultados.

2.4.1 Executando (Run) um projeto

Para executar o projeto, basta selecionar o comando  (**Run**).

Caso o modelo esteja adequadamente configurado, o EPANET apresentará um aviso que os cálculos foram bem-sucedidos, conforme apresentado na **Figura 48**:

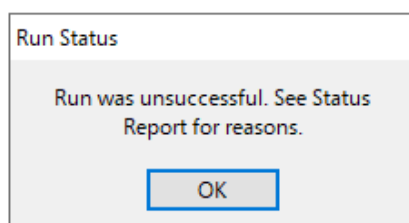
Figura 48: Mensagem que o modelo foi executado corretamente.



Fonte: O autor

No entanto, caso haja algum erro na construção do projeto, ele pode não ser executado pelo sistema, sendo então apresentada uma mensagem indicando que a simulação não obteve sucesso, conforme apresentado na **Figura 49**:

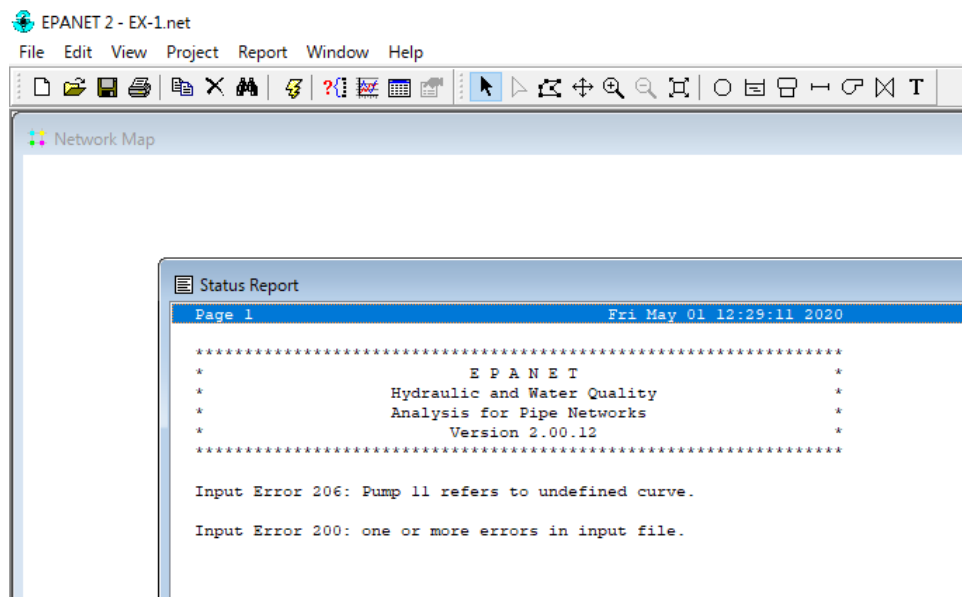
Figura 49: Mensagem que o modelo não foi executado corretamente.



Fonte: O autor

No caso de insucesso na realização dos cálculos, será apresentado um informe com o(s) tipo(s) de erro(s) observados. Como exemplo, pode ser observada a **Figura 50**, no qual é apresentado um informe indicando que a **bomba 11 (Pump 11)** não possui uma curva associada a ela, gerando assim, um erro no arquivo de entrada.

Figura 50: Exemplo de informe sobre erro na construção do projeto.

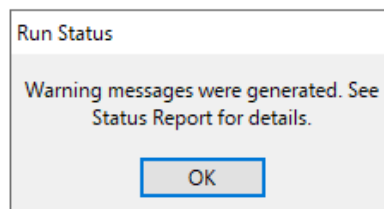


Fonte: O autor

Dependendo da situação, é possível que o EPANET execute os cálculos apresentando, porém, mensagens de advertência; por exemplo, quando a pressão se torna negativa.

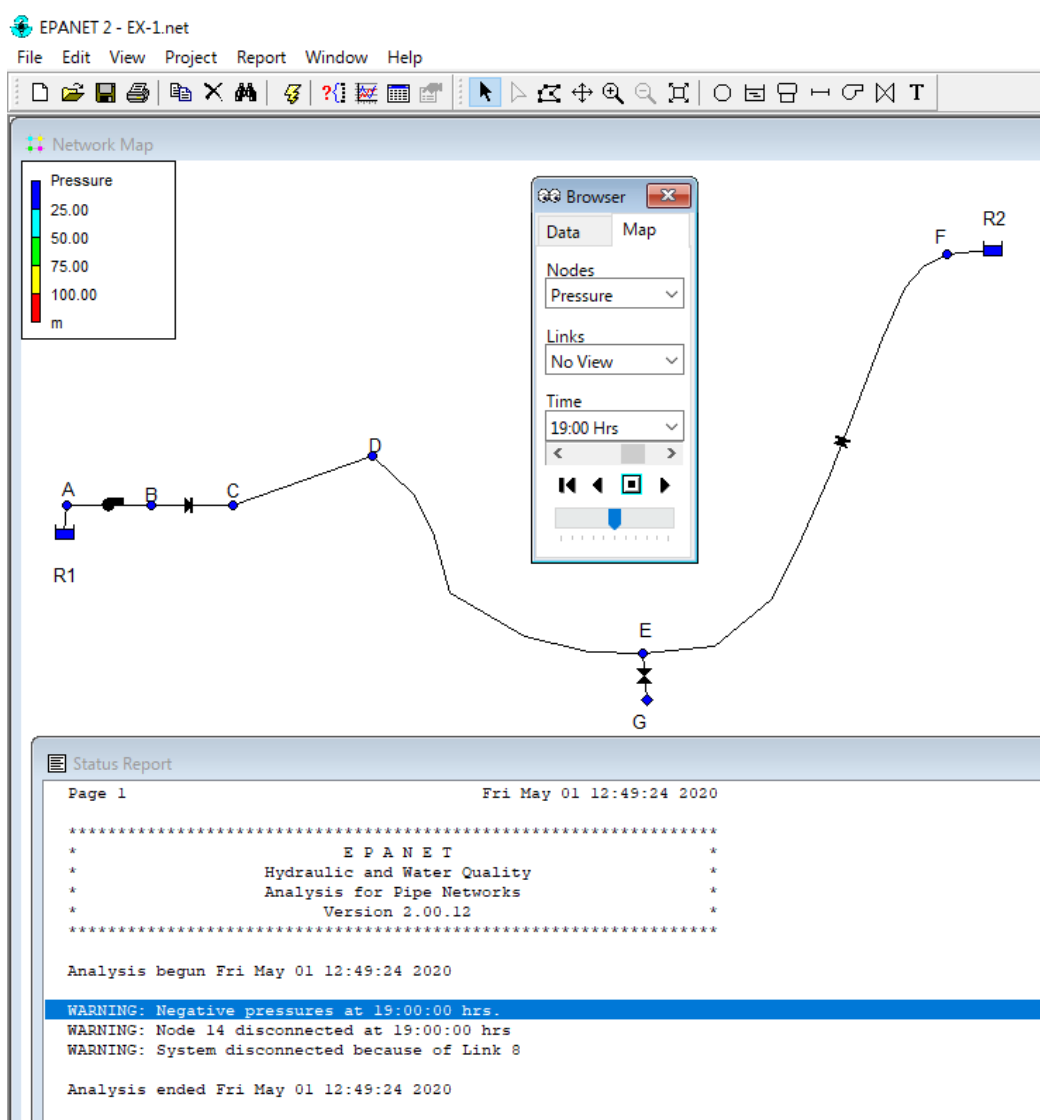
A **Figura 51** ilustra a mensagem de advertência e a **Figura 52** ilustra um informe da ocorrência observada:

Figura 51: Mensagem de advertência gerada pelo EPANET após a realização da simulação.



Fonte: O autor

Figura 52: Informe gerado alertando a quebra de pressão em um nó.



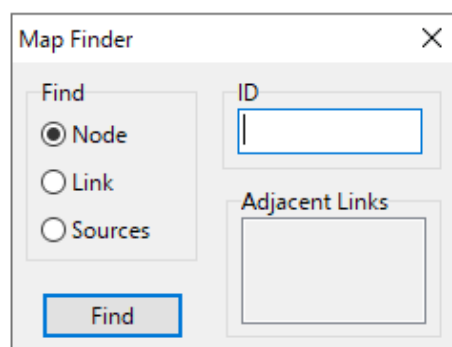
Fonte: O autor

2.4.2 Procurando por um componente físico (*Find*)

Muitas vezes é necessário encontrar um determinado componente físico no projeto em que se está trabalhando, principalmente quando há vários componentes dispostos na tela.

Para encontrar um determinado componente físico, basta selecionar o comando  (**Find**). Ao selecionar o comando *Encontrar (Find)* é apresentada uma janela (**Map Finder**), semelhante à apresentada na **Figura 53**.

Figura 53: Quadro para busca de componentes físicas no projeto.

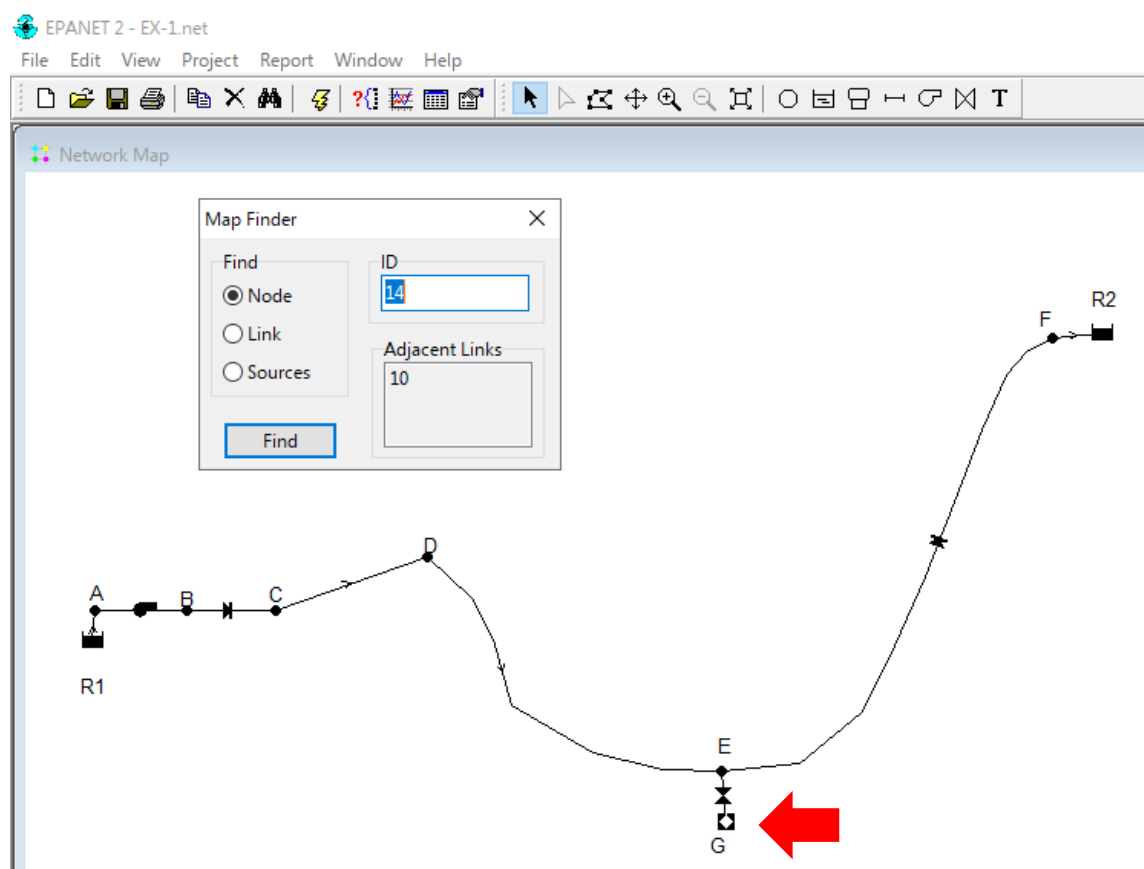


Fonte: O autor

No Mapa de Busca (**Map Finder**) é possível buscar por um nó (**Node**), trecho (**Link**) ou fonte de contaminação (**Source**).

Um exemplo da necessidade é quando, por exemplo, em uma mensagem de advertência o usuário é informado que um determinado nó apresenta pressão negativa. Ao inserir a identificação do nó informado, por exemplo: ID=14, o EPANET localiza o referido nó e indica os trechos ou nós adjacentes. A **Figura 54** ilustra essa situação:

Figura 54: Encontrando um determinado componente físico em um projeto.



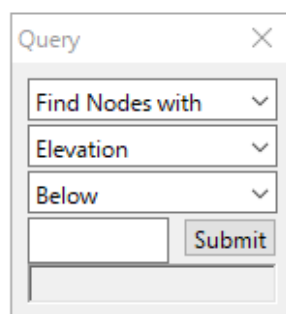
Fonte: O autor

2.4.3 Investigando as características dos componentes físicos (*Query*)

Em um projeto, muitas vezes é necessário buscar por componentes físicos com determinadas características específicas, como por exemplo: cota de elevação, rugosidade, comprimento, etc. Tal necessidade é suprida pelo comando **Query**.

Para executar o comando de busca seletiva, basta selecionar o comando  (**Query**), fazendo surgir um quadro semelhante ao apresentado na **Figura 55**:

Figura 55: Quadro de busca seletiva do comando (**Query**).



Fonte: O autor

A **Tabela 7** apresenta os parâmetros de busca permitidos pelo comando **Query**, a partir da componente física e do valor relativo de busca.

Tabela 7: Parâmetros possíveis de busca em função do tipo de componente físico.

Componente Físico	Parâmetro de Busca	Valor de Busca
Nó (Node)	Cota de elevação (Elevation) Consumo médio (Base Demand) Qualidade Inicial (Initial Quality) Demanda (Demand) Cota Piezométrica (Head) Pressão (Pressure) Qualidade (Quality)	> valor (Above) = valor (Equal To) < valor (Below)
Trecho (Link)	Comprimento (Lenght) Diâmetro (Diameter) Rugosidade (Roughness) Coeficiente de Bulk (Bulk Coeff.) Coeficiente de Parede (Wall Coeff.) Vazão (Flow) Velocidade (Velocity) Perda de Carga Unitária (Unit Headloss) Fator de Atrito (Friction Factor) Taxa de Reação (Reaction Rate) Qualidade (Quality)	

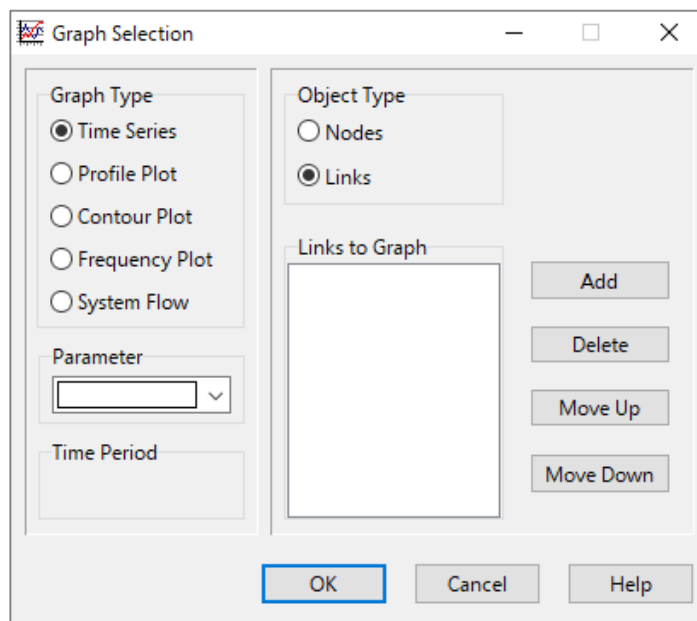
Fonte: O autor

2.4.4 Obtendo Resultados em Gráficos (*Graph*)

Após a execução de um projeto é possível obter a variação de um determinado parâmetro para algum componente físico. Para selecionar a opção de análise por gráfico, basta selecionar o comando  (**Graph**), fazendo surgir um quadro semelhante ao apresentado na

Figura 56.

Figura 56: Quadro para seleção de gráfico.

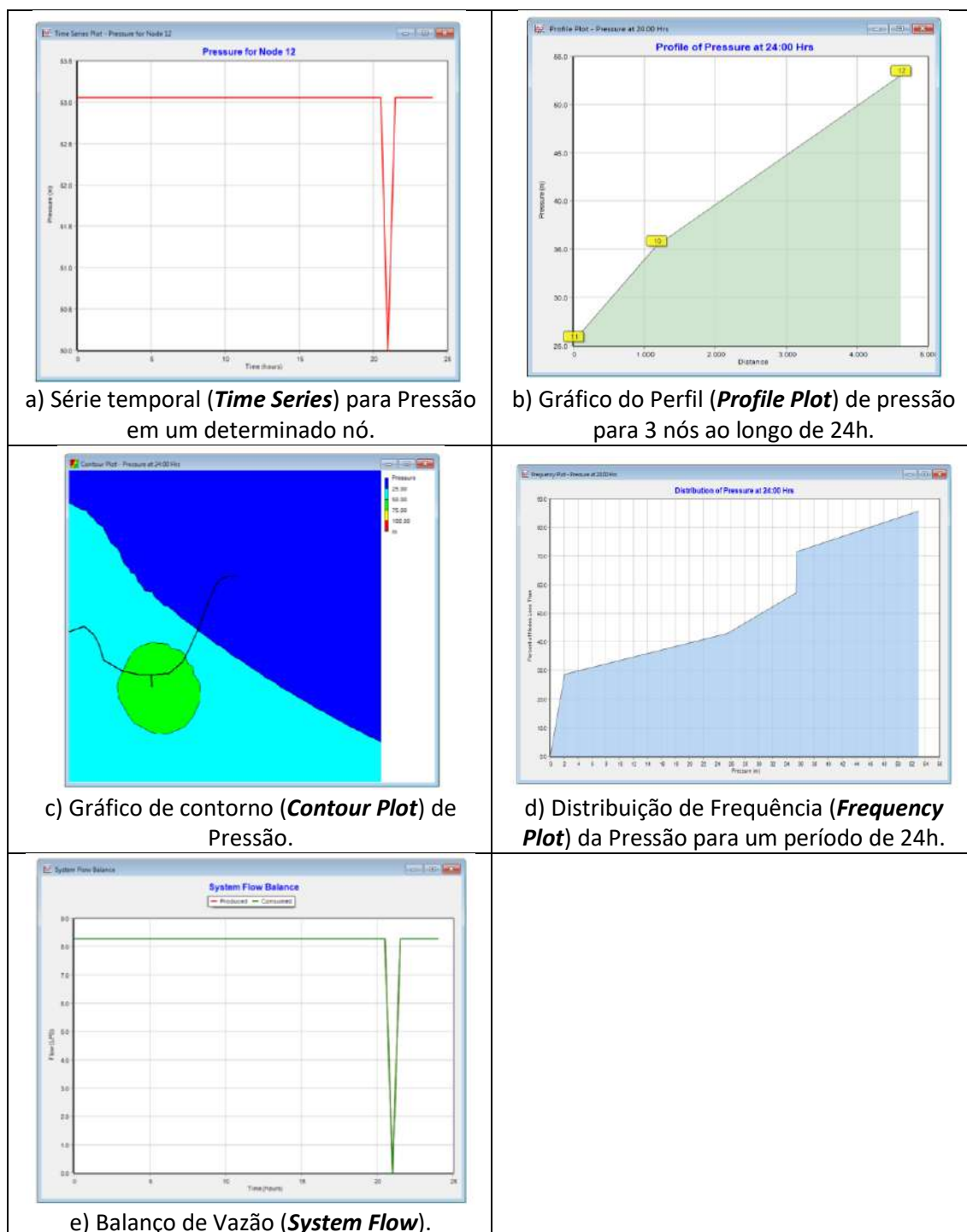


Fonte: O autor

No quadro para seleção de gráfico, é possível escolher o tipo de objeto que se pretende selecionar (nó ou trecho), assim como os tipos de gráficos disponíveis. Os parâmetros que podem ser considerados para a confecção dos gráficos são os mesmos empregados para buscas, estando apresentados na **Tabela 7. A**

Figura 57 ilustra os tipos de gráficos que podem ser gerados a partir do comando ***Graph***.

Figura 57: Possibilidade de geração de gráfico usando o **Graph**.



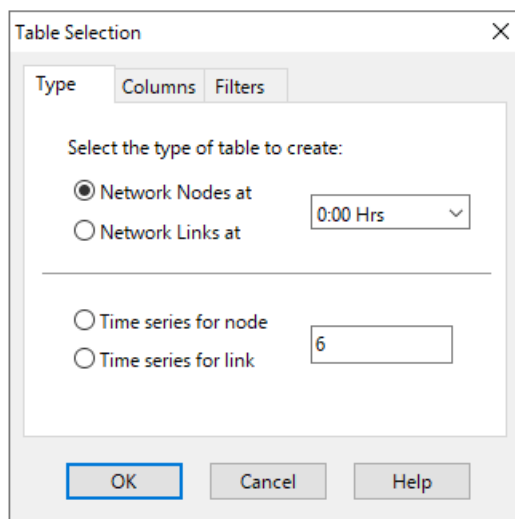
Fonte: O autor

2.4.5 Obtendo Resultados em Tabelas (Table)

Após a execução de um projeto, é possível obter tabelas com as características específicas para nós (**nodes**) ou trechos (**Links**) que compõem o sistema de abastecimento. Para selecionar

a opção para apresentação dos resultados em Tabela, basta selecionar o comando  (**Table**), fazendo surgir um quadro semelhante ao apresentado na **Figura 58**:

Figura 58: Seleção de Componentes e Parâmetros para construção da Tabela de Resultados.



Fonte: O autor

Os resultados podem ser obtidos para nós (**Junction**) e trechos (**Links**) em função dos parâmetros selecionados, podendo-se ainda aplicar filtros caso se deseje limitar os resultados dentro de intervalo pré-estabelecido.

A **Figura 59** apresenta, como exemplo, os resultados, de alguns parâmetros, tabelados para os nós (**Junctions**), enquanto a **Figura 60** apresenta os resultados, de alguns parâmetros considerados, tabelados para os trechos de tubulação (**Links**):

Figura 59: Tabela gerada com alguns parâmetros estabelecidos para os nós (**Junctions**) do sistema.

Network Table - Nodes at 0:00 Hrs			
Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 8	0.00	50.00	-1.00
Junc 9	0.00	86.42	35.42
Junc 10	0.00	86.39	35.39
Junc 11	0.00	85.48	25.48
Junc 12	0.00	83.06	53.06
Junc 13	0.00	80.03	2.03
Junc 14	0.00	30.00	0.00
Resvr 5	-8.27	50.00	0.00
Resvr 6	8.27	80.00	0.00

Fonte: O autor

Figura 60: Tabela gerada com alguns parâmetros dos trechos (**Links**) do sistema.

Link ID	Length m	Diameter mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km
Pipe 4	2	200	8.27	0.26	0.74
Pipe 5	10	150	8.27	0.47	3.03
Pipe 6	300	150	8.27	0.47	3.03
Pipe 7	800	150	8.27	0.47	3.03
Pipe 8	1000	150	8.27	0.47	3.03
Pipe 9	10	150	8.27	0.47	3.03
Pump 11	#N/A	#N/A	8.27	0.00	-36.42
Valve 10	#N/A	50	0.00	0.00	0.00

Fonte: O autor

2.5 Salvando, Lendo, Exportando e Importando um Arquivo

- SALVANDO:**

Para salvar um arquivo do EPANET, basta selecionar o botão . Os arquivos do EPANET possuem a extensão **.NET**.

- EXPORTANDO:**

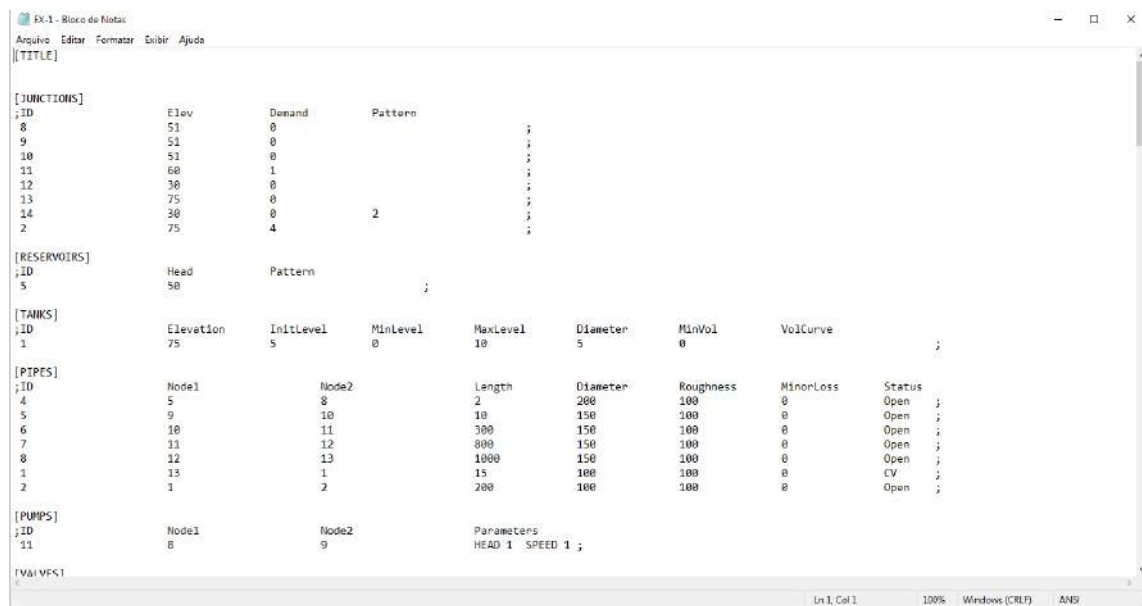
A partir de um projeto é possível exportar uma rede. Para isso, basta acessar a barra de Menu em **File >>> Export >>> Network**. Abre-se uma caixa de diálogo para nomear o arquivo a ser exportado, o qual recebe a extensão **.INP**.

Os arquivos **.INP** são arquivos textos e podem ser abertos em um bloco de notas. Ele contém todas as informações que caracterizam o sistema de abastecimento.

É possível alterar algumas características das componentes físicas e não físicas presentes no arquivo texto **.INP** para posterior execução no EPANET. Esses arquivos possuem uma estrutura própria, mas que não será abordada nesta apostila.

A **Figura 61** exemplifica o formato de um arquivo **.INP**.

Figura 61: Imagem parcial de um arquivo .INP.



Fonte: O autor

- **IMPORTANDO:**

Uma vez que não se dispõe do arquivo .NET, é possível recuperar um projeto a partir da importação do arquivo .INP.

Para isso, basta acessar a barra de Menu em **File >>> Imports >>> Network...**, quando será apresentada uma caixa de diálogo para carregar o arquivo com extensão .INP.

Uma vez carregado o arquivo, o EPANET recria o projeto, sendo então recomendável salvar o arquivo na extensão .NET.

- **LENDO:**

Para ler um arquivo do EPANET, basta selecionar o botão  com o que se abre uma caixa de diálogo para inserção do arquivo, cuja extensão é .NET.

3 CONFIGURANDO UM PROJETO NO EPANET

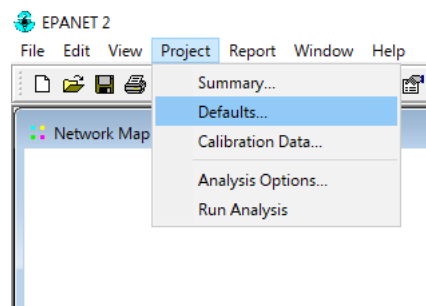
Cada exercício ou trabalho feito no EPANET é denominado de **projeto**.

Antes de iniciar cada projeto é necessário configurar o EPANET para que ele possa realizar os cálculos adequadamente.

Assim, **TODA VEZ** que iniciar o EPANET, faz-se necessário aplicar este ritual.

3.1 Alterando as propriedades Default

Na barra de Menu, selecione **Project>>> Defaults...**

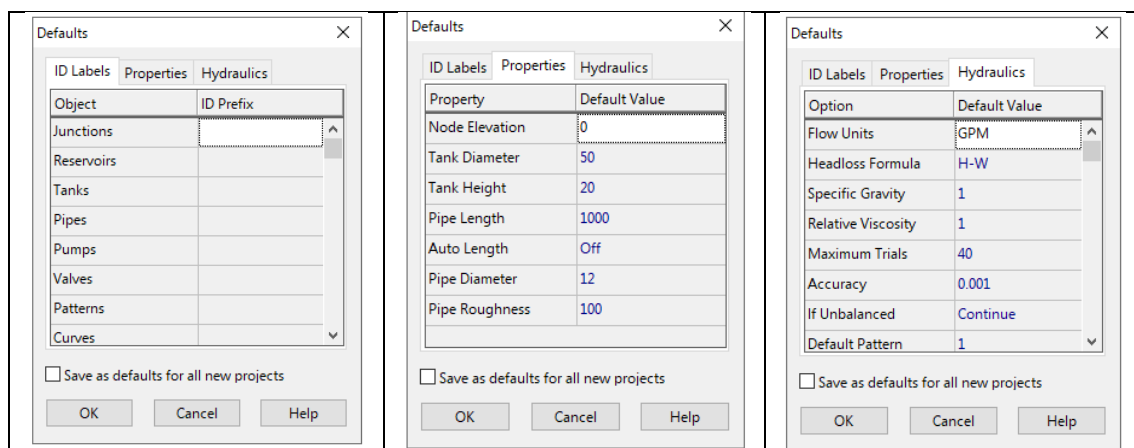


Surgirá na tela, uma Tabela com valores Padrão (**Default**) usado pelo EPANET e que podem, e muitas vezes devem, ser alterados pelo usuário.

Essa *Tabela Default* possui três abas: **ID Labels**, **Properties** e **Hydraulics**. A

Figura 62 ilustra parte das três abas citadas:

Figura 62: Tabela Default e as abas ID Labels, Properties e Hydraulics.



Fonte: O autor

Vale mencionar que os valores tidos como **Default** são empregados automaticamente pelo EPANET quando são inseridos em um projeto, podendo, no entanto, ser alterados posteriormente.

No caso das propriedades apresentadas em **Properties** pode ser vantajoso fazer a alteração do **Default**. Ainda que possam ser alterados posteriormente, pode-se economizar tempo. Imagine uma rede de distribuição de água com 50 trechos com diâmetro 50mm. Já imaginou ter que alterar manualmente cada um dos trechos?

- A aba **ID Labels**, permite que o usuário insira prefixos de identificação para os Nós (**Junctions**), Reservatórios (**Reservoirs**), Tanques (**Tanks**), Tubulações (**Pipes**), Bombas (**pumps**), Padrões (**patterns**), Curvas características (**Curves**), ou mesmo a taxa de variação da numeração de cada item identificado (**ID Increment**), que como padrão é 1.

Nas abas **Properties** e **Hydraulics** é que, normalmente, são necessárias alterações para adequação a utilização rotineira.

- Na aba **Properties**, o usuário pode alterar algumas das propriedades de alguns objetos, considerados, como: Cota de elevação dos nós (**Node Elevation**), diâmetro do tanque (**Tank Diameter**), altura do tanque (**Tank Height**), comprimento da tubulação (**pipe length**), diâmetro da tubulação (**pipe diameter**) e rugosidade da tubulação (**pipe roughness**).

No entanto, embora na aba não sejam informadas as unidades dos parâmetros, elas estão associadas a alguns dos parâmetros hidráulicos indicados na aba **Hydraulics**. As unidades empregadas nos parâmetros ficam estabelecidas em função da escolha da unidade de vazão a ser empregada, como será apresentado adiante.

- A aba **Hydraulics** permite que usuário altere a unidade de vazão (**Flow Units**); fórmula da perda de carga (**Headloss Formula**); peso específico (**Specific Gravity**); viscosidade relativa (**Viscosity Relative**); fator multiplicativo do padrão de consumo (**Default Pattern**); fator multiplicativo da demanda (**Demand Multiplier**); expoente do emissor (**Emitter Expoent**) e alguns outros parâmetros referentes ao processo numérico e que não serão aqui abordados.

A **Tabela 8** apresenta as unidades de vazão utilizadas pelo EPANET e, consequentemente, as unidades dos demais parâmetros empregados nos cálculos.

Tabela 8: Unidades de medida empregada pelo EPANET a partir da unidade de vazão adotada.

PARÂMETRO	Unidade usual Americana disponibilizada no EPANET	Unidades do Sistema métrico SI disponibilizado pelo EPANET
Vazão	CFS (pés cubic./s) GPM (galões/min) MGD (milhões de galões/dia) IMGD (Imperial MGD) AFD (acre-pés/dia)	LPS (litros/s) LPM (litros / min.) MLD (megalitros / dia) CMH (metros cúbicos/ hora) CMD (metros cúbicos/ dia)

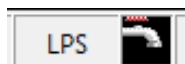


Diâmetro (tubulação)	polegadas	milímetros
Diâmetro (tanks)	pés	metros
Eficiência	%	%
Elevação	pés	metros
Coeficiente de emissão	Unidade de vazão / psi ^{0,5}	Unidade de vazão/m ^{0,5}
Carga Hidráulica	Pés	Metros
Comprimento	Pés	Metros
Pressão	Libras/polegada ²	Metros de coluna d'água
Velocidade	Pés/s	Metros/s

Fonte: Adaptado de ROSSMAN (2000).

Dessa maneira, por exemplo, ao selecionar a vazão em **LPS** (litros por segundo) no EPANET, fica implícito que o diâmetro da tubulação deverá ser fornecido em metros.

Ao selecionar a unidade de vazão a ser utilizada, e consequentemente as demais unidades dos outros parâmetros, fica aparente no lado inferior esquerdo da tela do EPANET.



Com relação ao cálculo da perda de carga, o EPANET poderá empregar as fórmulas de Hazen-Willians (**H-W**), Darcy-Weisbach (**D-W**) e Chezzy com coeficiente de Manning (**C-M**).

Assim, no sistema internacional de medidas (SI), o coeficiente de perda de carga da tubulação (**Pipe Roughness**), pode ter as unidades em função da equação de perda de carga escolhida, conforme apresentado na **Tabela 9**:

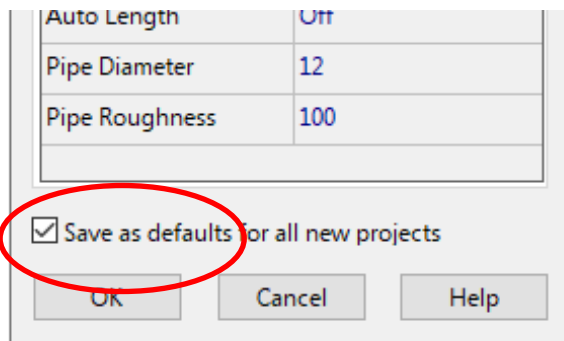
Tabela 9: Unidade de medida no SI para o parâmetro Rugosidade da Tubulação (**Pipe Roughness**) utilizado no EPANET.

Equação de Perda de Carga empregada pelo EPANET		Símbolo	Unidade no SI
Hazen-Willians	H-W	C	$m^{0,68} \cdot s^{-1,85}$
Darcy-Weisbach	D-W	ε	mm
Chézy-Manning	C-M	n	$m^{1/3} \cdot s^{-1}$

Fonte: Adaptado de ROSSMAN (2000)

Após adotar os valores padrão (**Defaults**) é possível salvá-los para usar em futuros projetos, selecionando a opção **Save...**, na parte inferior de cada uma das abas, conforme apresentado na **Figura 63**:

Figura 63: Armazenando os padrões (**Default**) para futuros projetos.



Fonte: o autor

3.1.1 Diâmetro Comercial e Diâmetro Interno

O Diâmetro Nominal (DN) representa, aproximadamente, o diâmetro interno das tubulações. Trata-se de um número inteiro, em geral, múltiplo de 10, empregado para facilitar a identificação da tubulação.

Alguns materiais são especificados por seu diâmetro externo (DE), como o caso dos tubos em PEAD, já para outros materiais são especificados pelo diâmetro nominal (DN), como o ferro fundido e o PVC.

No entanto, nos cálculos hidráulicos, deve-se sempre utilizar o diâmetro interno das tubulações. Deve-se tomar cuidado ao selecionar o diâmetro, pois no cálculo da perda de carga é a variável mais sensível, já que seu valor é elevado a, aproximadamente 5 ou 6!

Os diâmetros internos das tubulações podem variar segundo sua classe de pressão. Portanto, sempre que for dimensionar uma tubulação, consulte o manual do fabricante.

A **Tabela 10**, **Tabela 11** e **Tabela 12** apresentam os diâmetros Nominais (DN), os diâmetros Internos (DI) e as classes de pressão de algumas tubulações.

Tabela 10: Dimensões características dos diâmetros das tubulações de PVC PBA.

	Classe de Pressão	Dimensões Características dos Diâmetros (mm)		
		DN	De	Di
12 (0,6MPa)		50	(60) 60,4	55,0
		75	(85) 85,6	77,8
		100	(110) 110,6	100,6
15 (0,75MPa)		50	(60) 60,4	53,8
		75	(85) 85,6	76,2
		100	(110) 110,6	98,4
20 (1,0 MPa)		50	(60) 60,4	51,8
		75	(85) 85,6	73,4
		100	(110) 110,6	95,0

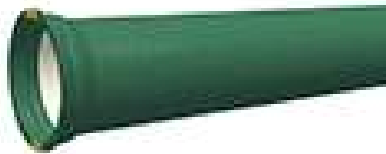
Fonte: Adaptado de TIGRE (s.d.) (DN – Diâmetro Nominal, De – Diâmetro Externo, Di – Diâmetro Interno).

Tabela 11: Dimensões características dos diâmetros das tubulações de PVC DEFoFo.

	Classe de Pressão	Dimensões Características dos Diâmetros (mm)		
		DN	De	Di
20 (1,0 MPa)		100	118	103
		150	170	149
		200	222	194
		250	274	240
		300	326	285
		350	378	331

Fonte: adaptado de TIGRE (s.d.). (DN – Diâmetro Nominal, De – Diâmetro Externo, Di – Diâmetro Interno).

Tabela 12: Dimensões características dos diâmetros das tubulações de FoFo junta elástica (J2GS).

	Classe de Pressão	Dimensões Características dos Diâmetros (mm)		
		DN	De	Di
	K7 (6,4 MPa)	80	98	88
		100	118	108
		150	170	160
	K7 (5,3 MPa)	200	222	211
	K7 (4,4 MPa)	250	274	263
	K7 (3,8 MPa)	300	326	314
	K7 (3,4 MPa)	350	378	366
	K7 (3,0 MPa)	400	429	416
	K7 (2,9 MPa)	450	480	467
	K7 (2,8 MPa)	500	532	518

Fonte: adaptado de Saint-Gobain (2015). (DN – Diâmetro Nominal, De – Diâmetro Externo, Di – Diâmetro Interno).

3.1.2 Coeficientes de Perda de Carga Distribuída (*Pipe Roughness*)

O coeficiente de perda de carga distribuída deve ser compatível com a equação de perda de carga considerada.

A **Tabela 13** apresenta alguns coeficientes de perda de carga distribuída (***Pipe Roughness***) para tubos novos:

Tabela 13: Coeficientes de perda de carga distribuída (***Pipe Roughness***) para tubos novos.

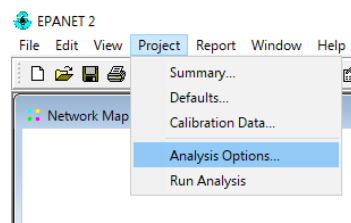
Material	Hazen-Willians ($m^{0,68} \cdot s^{-1,85}$)	Darcy-Weisbach (adimensional)	Chézy-Manning ($m^{1/3} \cdot s^{-1}$)
Ferro Fundido	130-140	0,85	0,012-0,015
Ferro galvanizado	120	0,5	0,015-0,017
Plástico	140-150	0,005	0,011-0,015

Fonte: Adaptado de ROSSMAN (2000).

3.2 Verificando as opções adotadas no projeto (Analysis Options...)

A qualquer momento, é possível verificar, de maneira conjunta, todas as opções consideradas para o cálculo do projeto.

Na barra de Menu, selecione **Project>>> Analysis Options...**



Após a seleção de **Analysis Options** é apresentado um quadro com as opções hidráulicas consideradas no projeto, semelhante ao da **Figura 64**.

Figura 64: Opções hidráulicas (**Hydraulics Options**) consideradas no projeto.

Hydraulics Options	
Property	Value
Flow Units	LPS
Headloss Formula	H-W
Specific Gravity	1
Relative Viscosity	1
Maximum Trials	40
Accuracy	0.001
If Unbalanced	Continue
Default Pattern	1
Demand Multiplier	1.0
Emitter Exponent	0.5
Status Report	No
CHECKFREQ	2

Fonte: O autor

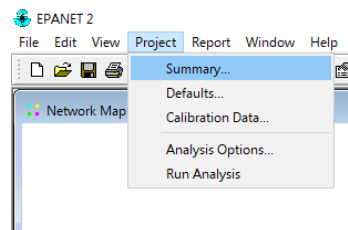
Nesse quadro, é possível fazer alterações de qualquer um dos parâmetros hidráulicos adotados no projeto, de maneira semelhante ao apresentado anteriormente em **Project>>>Defaults...>>> aba Hydraulics**.

3.3 Preenchendo o Sumário do Projeto

Após a configuração das propriedades **Default** do projeto, resta preencher as informações acerca do projeto, completando o **Summary...**

O cumprimento ou não desta etapa em nada afeta o desempenho dos cálculos a serem realizados, porém, permite que sejam armazenados detalhes e características específicas do projeto.

Na barra de Menu, selecione **Project>>> Summary...**



Surgirá um quadro semelhante ao apresentado na **Figura 65**.

Figura 65: Preenchendo o Sumário (**Summary**) do projeto.

 A screenshot of the 'Project Summary' dialog box. It contains three main sections: 'Title', 'Notes', and 'Statistics'. The 'Title' section has a text box with 'Exercício 1 - Curso Introdução ao EPANET' and a checked checkbox 'Use as header for printing'. The 'Notes' section has a text area with the text 'Trata-se da resolução do exercício proposto como primeira atividade avaliativa. Este exercício foi desenvolvido em 27/04/2020.' The 'Statistics' section shows a list of project parameters and their values.

Statistics	
Number of Reservoirs	0
Number of Tanks	0
Number of Pipes	0
Number of Pumps	0
Number of Valves	0
Flow Units	LPS
Headloss Formula	H-W
Quality Parameter	None

 At the bottom right of the dialog are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Fonte: O autor

Nesse quadro, é possível dar um título ao projeto (não é o nome do arquivo!), bem como alguma descrição a seu respeito. Na parte inferior são apresentadas algumas informações do projeto, como número de nós (**junctions**), tubulações (**links**), bombas (**pumps**) e válvulas (**valves**), assim como características como unidade de vazão (**flow units**), equação da perda de carga (**headloss formula**) entre outras que foram estabelecidas nas condições **Default**.

Terminado o preenchimento do **Summary**, deve-se concordar selecionando .

Ressaltamos que as informações contidas no **Summary** são únicas para cada projeto, diferentemente das condições **Default** que podem ser salvas para utilização futura.

3.4 Alterando as Opções do Map (MapOptions)

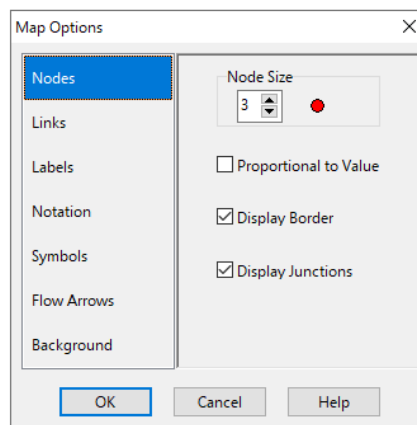
O EPANET permite que o usuário faça algumas alterações na forma de apresentação em tela dos projetos.

Pelo ícone , ou na barra de Menu, selecione **View>>> Options...** Será apresentado um quadro semelhante ao da **Figura 66**.

Nesse quadro é possível alterar algumas configurações usadas pelo EPANET para:

- Nós (**Nodes**);
- Tubulações (**Links**);
- Identificação visual (**Notation**);
- Ícones de alguns componentes físicos (**Symbols**);
- Sentido do fluxo (**Flow Arrows**);
- Fundo da tela (**Background**).

Figura 66: Alterando as Opções do **Map**.



Fonte: O autor

Na opção “**Nós (Nodes)**” é possível alterar o tamanho da apresentação na tela; permitir que o tamanho de visualização do nó seja proporcional ao valor da propriedade estabelecida no Visualizador/Navegador (elevação, pressão, altura manométrica...); ou apresentar o nó na tela.

Na opção “**Tubulações (Links)**” as opções são basicamente as mesmas que as dos Nós, exceto pela opção de desenhar ou não as tubulações.

A opção de ter apresentado o tamanho do Nó ou a espessura da tubulação (**Proportional to Value**) somente se verifica se no Visualizador/Navegador do EPANET a opção **view**, do nó e/ou do trecho, estiverem selecionadas e com alguma característica selecionada.

Em **Notation**, é possível selecionar opções para apresentar a identificação dos nós (**nodes**) e tubulações (**Links**), assim como seus valores característicos: pressão para os nós e vazão para as tubulações. Deve-se prestar atenção aos valores apresentados em Tela, já que podem estar próximos entre si e por não apresentarem unidades de medidas. Aí é muito fácil confundir-se! Apenas no caso de o **cursor** do EPANET ser posicionado sobre o nó ou o trecho é que são apresentados os valores com suas respectivas unidades.

Em **Symbols**, o usuário tem a opção de permitir a apresentação em tela (é o padrão!) ou não a identificação dos reservatórios, válvulas e bombas.

Em **Sentido do Fluxo (Flow Arrows)**, é possível optar pelo EPANET indicar o sentido do fluxo em uma tubulação após a realização dos cálculos hidráulicos. O padrão adotado pelo EPANET é não apresentar o sentido.

Na opção “**Fundo da tela (Background)**”, é possível que o usuário troque a cor de fundo da tela do EPANET.

3.5 Alterando as Legendas dos Mapas (Maps Legends)

Antes de alterar as legendas, é necessário entender que elas somente são apresentadas quando, no Visualizador/Navegador do EPANET é selecionada a visualização do Nó e/ou da tubulação, assim como definido os parâmetros que serão apresentados na legenda: para os nós - cota de elevação; pressão; cota piezométrica...; para os trechos – vazão, velocidade, perda de carga unitária, etc...

Dessa maneira, é possível criar uma legenda para a componente **Nó (Node)** e para a componente **tubulação (Link)**. O “problema” é que a legenda criada, com os intervalos de pressão estabelecidos, por exemplo, para pressão, será a mesma utilizada para representar as cotas piezométricas.

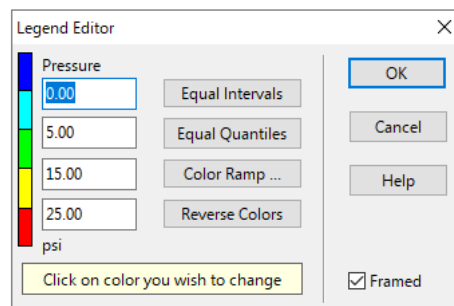
Assim o usuário deverá ficar atento e, sempre que necessário, adequar os intervalos estabelecidos na legenda para os valores característicos do parâmetro adotado.

Na barra de Menu, selecione **View>>> Legends**
Escolha a legenda a ser alterada: **Nó (Node)** ou **tubulação (Link)**.

Será apresentado o Editor de legenda, semelhante ao da **Figura 67**.

Nesse editor é possível definir as cores e os intervalos da legenda.

Figura 67: Editor da Legenda.



Fonte: O autor

4 MEU PRIMEIRO PROJETO NO EPANET

O conteúdo apresentado até aqui, aborda alguns aspectos básicos que o usuário do EPANET deverá possuir para o desenvolvimento de um projeto.

Neste capítulo, serão apresentados alguns exercícios de hidráulica para treinar as habilidades do leitor na construção de um modelo.

Parte dos exercícios aqui apresentados é baseada na obra Hidráulica Básica, do Prof. Rodrigo de Melo Porto (Porto, 1998).

Vamos a eles!

4.1 *Testando Meus Conhecimentos*

Para todo projeto construído no EPANET é necessário seguir o ritual apresentado no **Capítulo 3**:

1. Verifique as opções adotadas no projeto (**Sessão 3.2**). Aqui vamos trabalhar com a vazão em litros/segundo. Os demais parâmetros serão apresentados em cada exercício.
2. Preencha o sumário do projeto (**Sessão 3.3**). Preencha o título do exercício e nos comentários coloque seu nome e demais informações que julgar importante.
3. Insira as componentes físicas (nós, trechos, reservatórios, bombas e válvulas) conforme o esquema proposto para cada exercício. Se for necessário, reveja a sessão **2.2.1**.
4. Complete e verifique as propriedades de cada componente não físico (cotas de elevação, cota piezométrica, tipo de válvula, comprimentos e diâmetros dos trechos, etc). Se for necessário, reveja a sessão **3.1**.
5. Verifique se há necessidade de relacionar algum componente físico a algum componente não físico (curvas, padrões, etc.). Se necessário, reveja a sessão **2.2.2**.
6. Insira a opção para o EPANET mostrar o sentido do escoamento (Sessão **3.4**).
7. Execute o modelo gerado empregando o comando **Run** (Sessão **2.4.1**).
8. Analise os resultados calculados pelo EPANET.
9. Salve o modelo gerado em um arquivo .NET (sessão **2.5**).

4.1.1 EXERCÍCIO 1: Trabalhando com perdas de carga localizada-Sifão¹

Em um distrito de irrigação, um sifão de 2" de diâmetro possui as dimensões indicadas na **Figura 68** e é colocado sobre um dique. Estime a vazão esperada sob uma carga hidráulica de 0,50m e a carga de pressão disponível no ponto médio do trecho horizontal do sifão. Adote os seguintes coeficientes de perda de carga localizada: entrada $K_e=0,5$, saída $K_s=1,0$, curva de 45° $K=0,2$. Material da tubulação ferro fundido com revestimento asfáltico. Utilize a equação de Darcy-Weisbach.

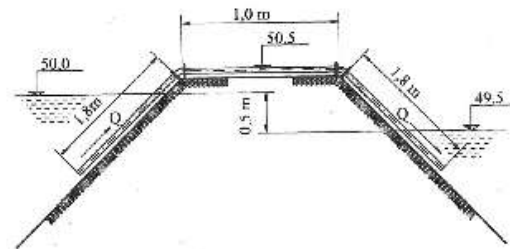


Figura 68: Sifão.

Fonte: PORTO (1998)

$$\left[Q \cong 2,9 \frac{l}{s}; p/\gamma = -0,83mH_2O \right]$$

- **Explicações/considerações:**

- Para tubulação de Ferro Fundido 2" - $\phi_i \cong 50mm$.
- Para tubo de Ferro Fundido com revestimento asfáltico² – Rugosidade $\varepsilon = 0,15mm$
 $\rightarrow f = 0,0281$.

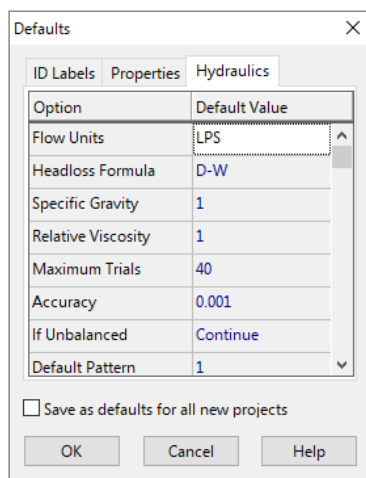
- **Construção do modelo no EPANET:**

- No menu de comandos vá em **Project >> Defaults >>>** aba **Hydraulic** e altere o cálculo da perda de carga para Darcy-Weisbach (D-W), observando que a vazão será aplicada na unidade de litros/segundo (LPS), conforme apresentado na **Figura 69**.

¹ PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. EESC/USP. 1ª Ed, Exercício 3.1. Pág. 88.

² No exercício de hidráulica, um dos objetivos é treinar a habilidade para determinar, por tentativa e erro, o fator de rugosidade. Na aplicação do modelo computacional basta fornecer o fator f .

Figura 69: Alterando as opções de Unidade de Fluxo (**Flow Units**) e fórmula da perda de carga (**Headloss Formula**) para o Exercício 1.

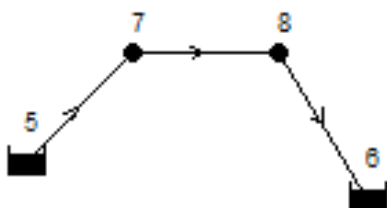


Fonte: O autor

- Usando as componentes físicas do EPANET, desenhe o esquema conforme a **Figura 68. A**

Figura 70 ilustra o esquema do modelo:

Figura 70: Esquema do sifão no EPANET.



Fonte: O autor

Para o EPANET os reservatórios de nível constante – **RNC** possuem as identificações ID=5 e ID=6.

De maneira semelhante, os nós superiores possuem a identificação ID=7 e ID=8.

- Clicando duas vezes sobre os RNC (Reservoir), anote as cotas piezométricas (**Total Head**) com os valores 50.0 e 49.5.

- Clique duas vezes sobre os nós superiores, neste caso com ID=7 e ID=8, e insira as cotas de elevação (**Elevation**) para cada um deles, cujos valores são iguais a 50.5, conforme indicado na

Figura 71.

Figura 71: Correção das cotas piezométricas dos RNC.

Reservoir 5		Reservoir 6	
Property	Value	Property	Value
Tag		Tag	
*Total Head	50	*Total Head	49.5
Head Pattern		Head Pattern	
Initial Quality		Initial Quality	
Source Quality		Source Quality	
Net Inflow	#N/A	Net Inflow	#N/A
Elevation	#N/A	Elevation	#N/A
Pressure	#N/A	Pressure	#N/A
Quality	#N/A	Quality	#N/A

Fonte: O autor

- Edite as características específicas dos trechos compreendidos entre os nós 5-7, 7-8 e 8-6, individualmente. Será necessário inserir o comprimento, diâmetro, rugosidade e coeficiente de perda de carga localizada em cada um dos trechos, conforme indicado na **Tabela 14:**

Tabela 14: Parâmetros a serem alterados nos componentes físicos do Exercício 1.

Trecho	Comprimento (<i>Length</i>) [m]	Diâmetro Interno (<i>Diameter</i>) [mm]	Rugosidade (<i>Roughness</i>)	Coeficiente de Perda de Carga – K (<i>Coeff. Headloss</i>)
5 - 7	1.8	50	0.15	0.5
7 - 8	1.0	50	0.15	0.2
8 - 6	1.8	50	0.15	0.2 + 1.0 = 1.2

Fonte: O autor

- A **Figura 72** ilustra as alterações realizadas nos campos comprimento (*Length*), diâmetro (*Diameter*), rugosidade (*Roughness*) e Coeficiente de Perda de Carga (*Coeff. Headloss*), dos trechos de tubulações empregadas no modelo.

Figura 72: Alterações das propriedades das tubulações do Exercício 1.

Pipe 7		Pipe 5		Pipe 6	
Property	Value	Property	Value	Property	Value
*Length	1.8	*Length	1	*Length	1.8
*Diameter	50	*Diameter	50	*Diameter	50
*Roughness	0.15	*Roughness	0.15	*Roughness	0.15
Loss Coeff.	0.5	Loss Coeff.	0.2	Loss Coeff.	1.2
Initial Status	Open	Initial Status	Open	Initial Status	Open
Bulk Coeff.		Bulk Coeff.		Bulk Coeff.	
Wall Coeff.		Wall Coeff.		Wall Coeff.	
Flow	-2.90	Flow	2.90	Flow	2.90
Velocity	1.48	Velocity	1.48	Velocity	1.48

Trecho 5 - 7

Trecho 7 - 8

Trecho 8 - 6

Fonte: O autor

- Rode o modelo (**Run**) e visualize na forma de tabela (**Table**) os resultados, eles devem ser iguais aos valores apresentados na **Figura 73**:

Figura 73: Resultados obtidos pelo EPANET para o Exercício 1.

Network Table - Nodes				
Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
Junc 7	0.00	49.83	-0.67	0.00
Junc 8	0.00	49.75	-0.75	0.00
Resvr 5	-2.90	50.00	0.00	0.00
Resvr 6	2.90	49.50	0.00	0.00

Fonte: O autor

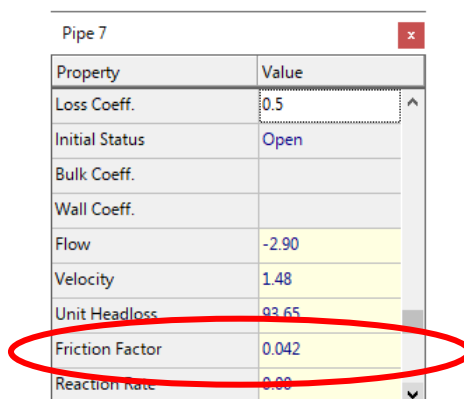
- Comentários:**

Analisando os resultados contidos na **Figura 73**, percebe-se que a vazão que passa pela tubulação é de 2,91 l/s. O sinal negativo no RNV (ID=5) indica que a vazão está saindo dele; já no RNC (ID=6) a vazão possui sinal positivo, pois indica que está entrando no reservatório.

A carga de pressão no meio do trecho 7 – 8 é da ordem de $\left(\frac{-0.67-0.75}{2}\right) = -0.71\text{mH}_2\text{O}$, valor muito próximo ao informado como resposta.

Para qualquer um dos trechos, ao se observar o fator de atrito, no caso **f**, calculado pelo EPANET, o usuário mais atento perceberá que o valor calculado está diferente daquele apontado nas considerações iniciais, conforme apresentado na **Figura 74**, referente ao trecho entre os nós 5 e 7.

Figura 74: Atenção ao fator de atrito (*Friction Factor*) calculado pelo EPANET.



Property	Value
Loss Coeff.	0.5
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	-2.90
Velocity	1.48
Unit Headloss	93.65
Friction Factor	0.042
Reaction Rate	0.00

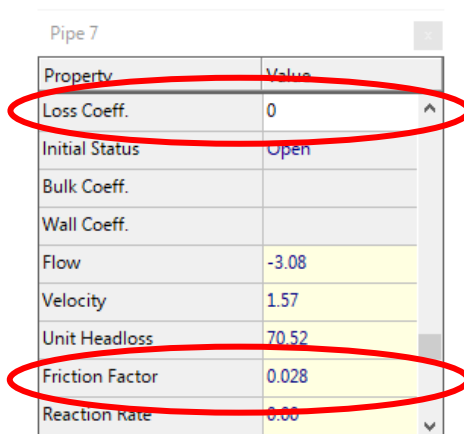
Fonte: O autor

Essa diferença ocorre, pois como há perda de carga localizada considerada no trecho, o EPANET determina o fator de atrito da tubulação a partir da soma da perda de carga distribuída e da perda de carga localizada.

Apenas para ilustrar essa situação, ao se retirar o coeficiente de perda de carga -K (**Loss Coeff.**), anula-se a perda de carga localizada no trecho. Ao rodar o modelo, restará a perda de carga distribuída, convergido o fator de atrito, no caso f, para o valor considerado no início do exercício.

A **Figura 75** ilustra a convergência do valor do fator de atrito:

Figura 75: Exemplificação da influência da perda de carga localizada no fator de atrito (f) calculado pelo EPANET.



Property	Value
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	-3.08
Velocity	1.57
Unit Headloss	70.52
Friction Factor	0.028
Reaction Rate	0.00

Fonte: O autor

4.1.2 EXERCÍCIO 2: Variação temporal do consumo de água

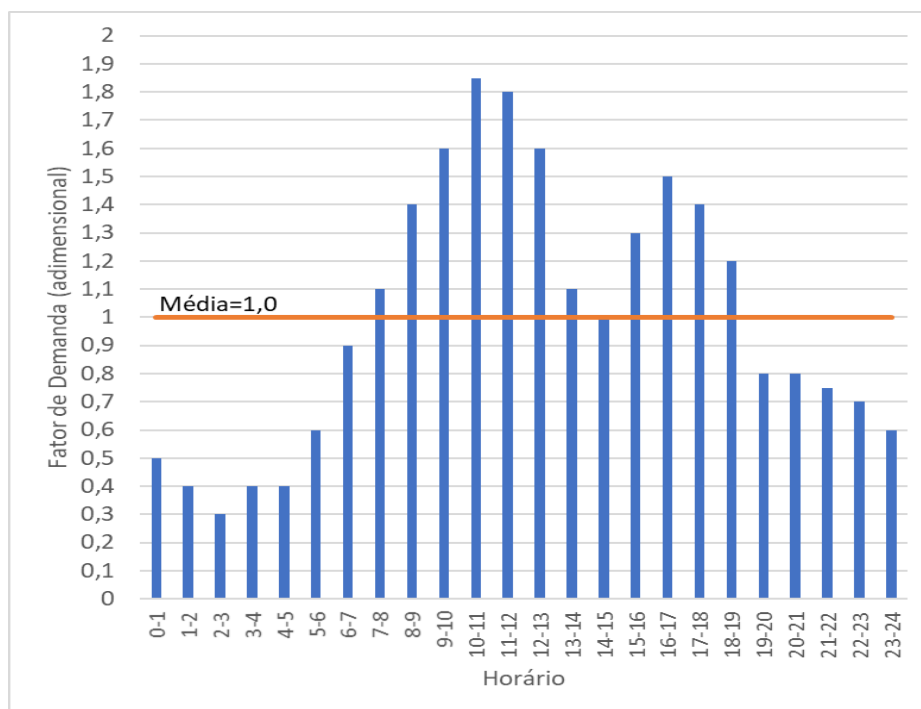
Uma ETA abastece um reservatório elevado que atende um determinado bairro. A ETA, situada na cota 550,00m, está interligada ao reservatório por uma adutora EM Ferro Fundido ($C=120$) DN100 com 1000m de extensão. O reservatório elevado é do tipo cilíndrico, com diâmetro de 4,00m e está assentado na cota 500m. O nível mínimo desse reservatório está a 12,00m e o nível máximo está a 16,00m ambos acima da cota de assentamento. A rede de distribuição que interliga o reservatório ao primeiro ponto de consumo é em PVC ($C=140$), possui diâmetro de DN 75 e extensão de 500,00m, cuja outra extremidade está na cota 470,00m.

A comunidade possui 1000 habitantes que consomem, em média, 150 l/pessoa/dia de água e apresenta variação temporal diária do consumo conforme **Figura 76**.

Uma válvula de controle de fluxo (FCV) está instalada na adutora, junto ao RNV de maneira a limitar a vazão encaminhada pela ETA em 1,75 l/s ao reservatório de abastecimento e que, às 10h o nível desse reservatório está em seu máximo pergunta-se:

- Nas primeiras 48h de simulação, em quais horários ocorrerão às máximas e mínimas pressões no primeiro ponto de abastecimento de água e quais os valores de pressão observados?
- Nas primeiras 48h de simulação, em quais horários ocorrerão às vazões máxima e mínima de consumo no primeiro ponto de abastecimento de água e quais seus valores?
- Nas primeiras 48h de simulação, em quais horários ocorreram os níveis máximo e mínimo no reservatório de nível variável?

Figura 76: Fatores de demanda pelo consumo de água - Exercício 2.



Fonte: O autor.

- **Explicações/considerações:**

- Vazão média de consumo: $\bar{Q} = \frac{P \cdot q}{86400} = \frac{1000 \text{ hab} \cdot 150 \frac{\text{l}}{\text{hab.dia}}}{86400 \frac{\text{s}}{\text{dia}}} = 1,74 \frac{\text{l}}{\text{s}}$.

- Fator mínimo de demanda = 0,3 (ver gráfico da **Figura 76**).

- Fator máximo de demanda = 1,85 (ver gráfico da **Figura 76**).

- Vazão máxima de consumo: $Q_{max} = \frac{\text{Fator de Demanda Máximo Considerado} \cdot \widehat{K_1} \cdot \widehat{K_2}}{86400} \cdot P \cdot q = 1,85 \cdot 1,74 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 3,22 \frac{\text{l}}{\text{s}}$.

- Vazão mínima de consumo: $Q_{min} = \frac{\text{Fator de Demanda Mínimo Considerado} \cdot \widehat{K_3}}{86400} \cdot P \cdot q = 0,3 \cdot 1,74 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0,52 \frac{\text{l}}{\text{s}}$.

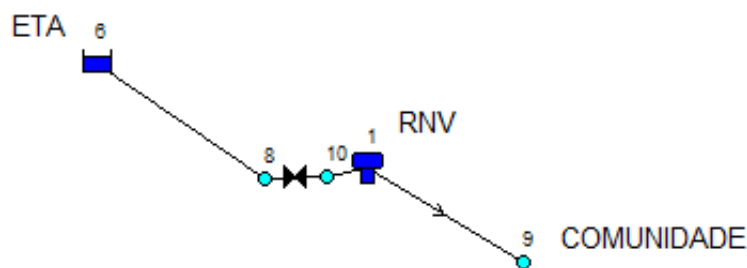
- Vazões esperadas para consumo: $Q_{min} \leq \text{Fato de Demanda} \cdot \bar{Q} \leq Q_{max}$.

- **Construção do modelo no EPANET:**

- No menu de comandos vá em **Project >> Defaults >>>** aba **Hydraulic** e altere o cálculo da perda de carga para Hazen-William (H-W), observando que a vazão será aplicada na unidade de litros/segundo (LPS).

- Usando as componentes físicas do EPANET, desenhe o esquema enunciado. **A Figura 77** ilustra o esquema do enunciado:

Figura 77: Esquema do sistema de abastecimento - Exercício 2.



Fonte: O autor

- Na ETA, representada pelo Reservatório de Nível Constante – **RNC**, identificado neste modelo pelo ID=6, defina a cota piezométrica (**Total Head**) em 550,00. Para isso, basta clicar duas vezes sobre o reservatório e será aberta a tabela com as características específicas dessa componente física.

- No Reservatório de nível variável – **RNC**, identificado neste pelo ID=1, defina os seguintes parâmetros: *Cota de Elevação (Elevation)* = 500,00; *Nível inicial (Initial level)* = 16,00; *Nível mínimo (Minimum Level)* = 12,00; *Nível máximo (Maximum Level)* = 16,00; *diâmetro (Diameter)* = 4,00.
- Nos **nós** identificados aqui pelos ID's 8, 9 e 10, defina as cotas de elevação para cada um deles. Os valores das cotas de elevação são, respectivamente: 500; 470; 500.
- Após traçar as tubulações entre os **nós** 6-8; 10-1 e 1-9; altere os parâmetros comprimento, diâmetro e rugosidade, conforme **Tabela 15**.

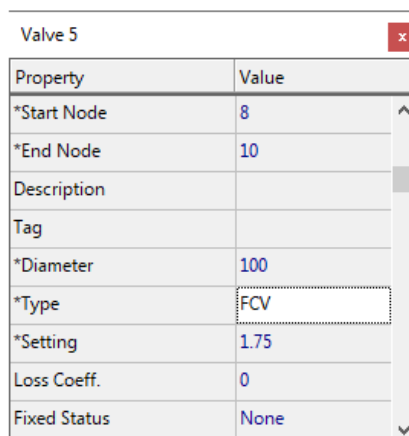
Tabela 15: Parâmetros a serem alterados nas componentes físicas do Exercício 2.

Trecho	Comprimento (<i>Lenght</i>) [m]	Diâmetro Interno (<i>Diameter</i>) [mm]	Rugosidade (<i>Roughness</i>)
6-8	999,00	100	120
10-1	1,00	100	120
1 – 9	500	75	140

Fonte: O autor

- Insira uma válvula do tipo controle de fluxo (**FCV**), tendo como parâmetros o *diâmetro (Diameter)* 75 e estabelecendo a vazão limite de 1.75 l/s em *setting*. A **Figura 78** ilustra os parâmetros característicos da válvula:

Figura 78: Alterando os parâmetros de uma válvula de controle de fluxo (**FCV**) - Exercício 2.

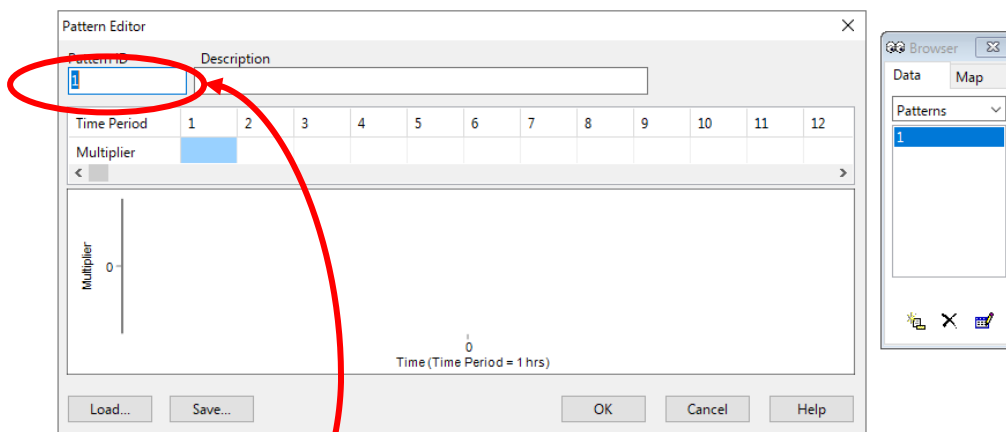


Valve 5		
Property	Value	
*Start Node	8	^
*End Node	10	
Description		
Tag		
*Diameter	100	
*Type	FCV	
*Setting	1.75	
Loss Coeff.	0	
Fixed Status	None	v

Fonte: O autor

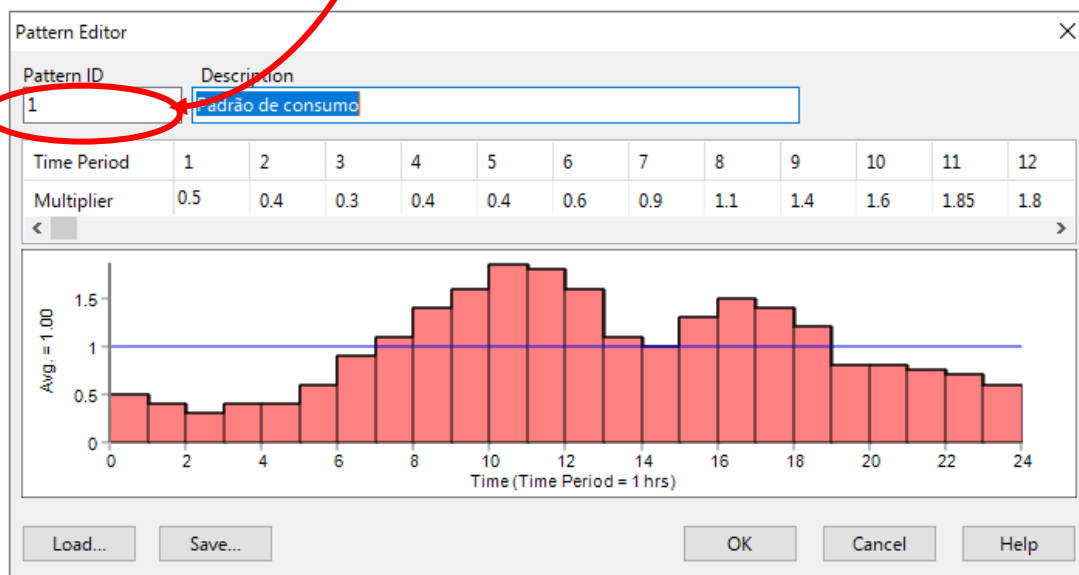
- Vá até o visualizador/navegador do EPANET e na aba **Date**, selecione **Pattern** e clique em *adicionar (Add)* para abrir o Editor de Padrão e permitir a adição do padrão de consumo de água, conforme indicado na **Figura 79**. Em seguida, entre os fatores de demanda apresentados no gráfico da **Figura 76**. O resultado deve ser semelhante ao apresentado na **Figura 80**:

Figura 79: Abrindo o editor de padrão do EPANET - Exercício 2.



Fonte: O autor

Figura 80: Inclusão dos fatores de consumo no Editor de Padrão - Exercício 2.



Fonte: O autor

- Clique duas vezes sobre o nó que representa a comunidade (aqui ID=9) e insira o *consumo médio* de água (**Base Demand**) estabelecido em 1,74 l/s e indique o número do padrão (**Pattern ID**) de consumo no campo *padrão de demanda* (**Demand Pattern**), conforme indicado na

Figura 81.

Figura 81: Inserindo o um nó - Exercício 2.

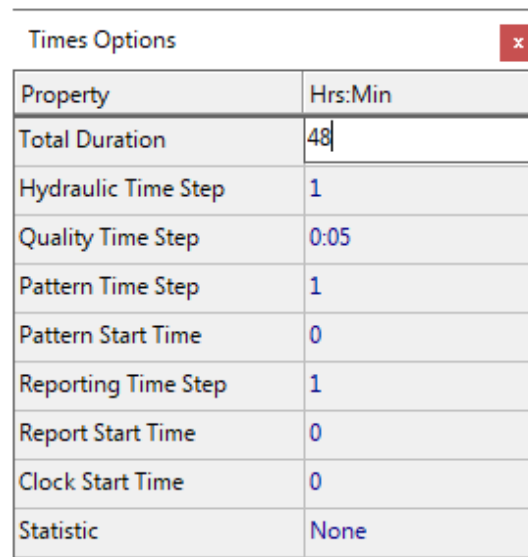
Junction 9	
Property	Value
X-Coordinate	6499.44
Y-Coordinate	6499.44
Description	
Tag	
*Elevation	470
Base Demand	1.74
Demand Pattern	1
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	

padrão de consumo em

- No visualizador/navegador (**Browser**) do EPANET, na aba **Date**, escolha **Options** e selecione **Times**. Estabeleça o tempo de simulação como sendo 48 horas, conforme apresentado na

Figura 82.

Figura 82: Preenchendo o editor de Opções de Tempo - Exercício 2.



Property	Hrs:Min
Total Duration	48
Hydraulic Time Step	1
Quality Time Step	0:05
Pattern Time Step	1
Pattern Start Time	0
Reporting Time Step	1
Report Start Time	0
Clock Start Time	0
Statistic	None

Fonte: O autor

- Rode (**Run**) o modelo e despreze o aviso de Atenção (**Warning!**) que será apresentado.
- Selecione o nó que corresponde à comunidade (aqui ID=9) e verifique os resultados em uma tabela, conforme apresentado na **Figura 83**.

Figura 83: Resultados de pressão e vazão obtidos após simulação de 48h de consumo no nó ID=9.

Time Series Table - Node 9				
Time Hours	Demand LPS	Head m	Pressure m	Quality
3:00	0.70	515.62	45.62	0.00
4:00	0.70	515.65	45.65	0.00
5:00	1.04	515.36	45.36	0.00
6:00	1.57	514.80	44.80	0.00
7:00	1.91	514.36	44.36	0.00
8:00	2.44	513.43	43.43	0.00
9:00	2.78	512.54	42.54	0.00
10:00	3.22	511.27	41.27	0.00
11:00	3.13	511.05	41.05	0.00
12:00	2.78	511.43	41.43	0.00
13:00	1.91	512.71	42.71	0.00
14:00	1.74	512.92	42.92	0.00
15:00	2.26	512.09	42.09	0.00
16:00	2.61	511.29	41.29	0.00
17:00	2.44	511.38	41.38	0.00
18:00	2.09	511.80	41.80	0.00
19:00	1.39	512.68	42.68	0.00
20:00	1.39	512.79	42.79	0.00
21:00	1.31	512.99	42.99	0.00
22:00	1.22	513.21	43.21	0.00
23:00	1.04	513.53	43.53	0.00
24:00	0.87	513.88	43.88	0.00
25:00	0.70	514.25	44.25	0.00
26:00	0.52	514.66	44.66	0.00
27:00	0.70	514.91	44.91	0.00
28:00	0.70	515.21	45.21	0.00
29:00	1.04	515.24	45.24	0.00
30:00	1.57	514.87	44.87	0.00
31:00	1.91	514.34	44.34	0.00
32:00	2.44	513.40	43.40	0.00
33:00	2.78	512.52	42.52	0.00
34:00	3.22	511.24	41.24	0.00
35:00	3.13	511.03	41.03	0.00
36:00	2.78	511.40	41.40	0.00

a) Durante as primeiras 48h de simulação as mínimas pressões observadas no primeiro nó que atende a comunidade (aqui ID=9) foram:

- $P_{\min}=41,05$ mH₂O às 11h00 do primeiro dia (11h de simulação)
- $P_{\min}=41,03$ mH₂O às 11h00 do segundo dia (35h de simulação).

Já as máximas pressões observadas foram:

- $P_{\max} = 45,65$ mH₂O às 4h00 do primeiro dia (4h de simulação)
- $P_{\max} = 45,24$ mH₂O às 5h00 do segundo dia (29h de simulação)

b) Durante as primeiras 48h de simulação às mínimas vazões de consumo foram:

- $Q_{\min}=0,7$ l/s às 3h00 do primeiro dia (3h de simulação)
- $Q_{\min} = 0,52$ l/s às 2h00 do segundo dia (26h de simulação).

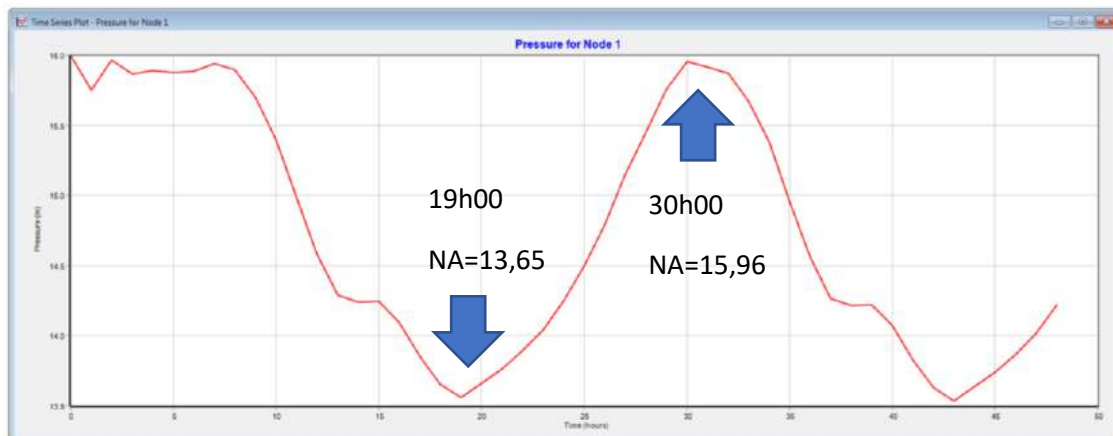
Já as máximas vazões observadas foram:

- $Q_{\max} = 3,22$ l/s às 10h00 do primeiro dia (10h de simulação)
- $Q_{\max} = 3,22$ l/s às 10h00 do segundo dia (34h de simulação)

Fonte: O autor

- Clicando uma vez sobre o reservatório de nível variável – RNV (aqui ID=1), e selecione os resultados em forma de gráfico, conforme apresentado na **Figura 84**.

Figura 84: Variação do nível do reservatório ao longo do período de simulação - Exercício 2.

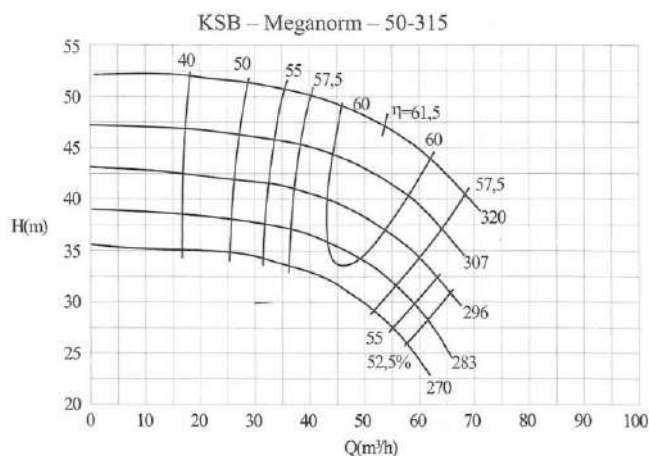


Fonte: O autor

4.1.3 EXERCÍCIO 3: Sistema de Recalque³

Considere uma adutora com $C=140$, altura geométrica $H_g=21\text{m}$, diâmetro de recalque $D_r=0,10\text{m}$, diâmetro de sucção $D_s=0,15\text{m}$, comprimento total, incluindo comprimentos equivalentes, da linha de recalque $L_r=444,37\text{m}$, da sucção $L_s=45,87$. Considerando que a rotação da bomba é de 1750rpm , o diâmetro do rotor de 296mm , cuja curva característica esta apresentada na **Figura 85**. Determine a vazão de recalque e a potência da bomba.

Figura 85: Curva característica da bomba-Exercício 3.



Fonte: Porto (1998).

- **Explicações/considerações:**

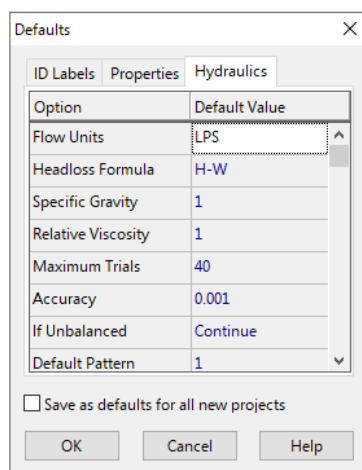
- Para construção da curva característica no EPANET, será utilizado o método de múltiplos pontos. Assim, para o rotor 296mm , os pontos escolhidos para determinação da curva foram: $60\text{ m}^3/\text{h}$ ($16,7\text{ l/s}$) e $35\text{ mH}_2\text{O}$; $45\text{ m}^3/\text{h}$ ($12,5\text{ l/s}$) e $40\text{ mH}_2\text{O}$; $20\text{ m}^3/\text{h}$ ($5,6\text{ l/s}$) e $42,5\text{ mH}_2\text{O}$; $0\text{ m}^3/\text{h}$ (0 l/s) e $43\text{ mH}_2\text{O}$.

- **Construção do modelo no EPANET:**

- No menu de comandos vá em **Project >> Defaults >>>** aba **Hydraulic** e altere o cálculo da perda de carga para **Hazen-William (H-W)**, observando que a vazão será aplicada na unidade de litros/segundo (LPS), conforme apresentado na **Figura 86**.

³ PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. EESC/USP. 1ª Ed, adaptado do Exercício 5.5. Pág. 151.

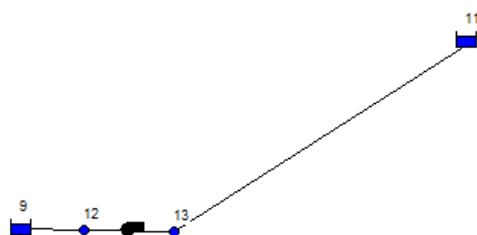
Figura 86: Alterando as opções de Unidade de Fluxo (**Flow Units**) e fórmula da perda de carga (**Headloss Formula**) para o Exercício 3.



Fonte: O autor

- Usando as componentes físicas do EPANET, desenhe o esquema enunciado. A **Figura 87** ilustra o esquema do modelo:

Figura 87: Esquema do sistema de recalque.



Fonte: O autor

Para o EPANET os reservatórios de nível constante – RNC possuem as identificações ID=9 e ID=11.

Os nós de interligação da bomba com as linhas de sucção e recalque possuem a identificação ID=12 e ID=13.

- Clicando duas vezes sobre os RNC (**Reservoir**), altere as cotas piezométricas (**Total Head**) com os valores 0.0 para o reservatório ID=9 e 21.0 para o reservatório ID=11.
- Clique duas vezes sobre os de ligação da bomba (ID=12 e ID=13) e insira as cotas de elevação (**Elevation**) para cada um deles, com o valor 0.0.
- Edite as características específicas dos trechos compreendidos entre os nós 9-12 e 13-11, individualmente. Será necessário inserir o comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade de *Hazen-Wiliam* para cada um dos trechos, conforme indicado na **Tabela 16**.

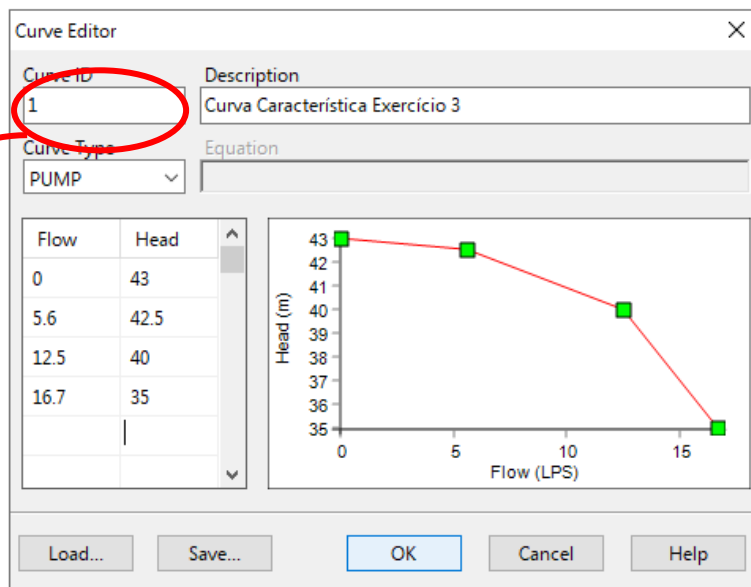
Tabela 16: Parâmetros a serem alterados nas componentes físicas do Exercício 3.

Trecho	Comprimento (<i>Lenght</i>) [m]	Diâmetro Interno (<i>Diameter</i>) [mm]	Rugosidade (<i>Roughness</i>)
9-12	45.87	150	140
13-11	444.37	100	140

Fonte: O autor

- No visualizador/navegador do EPANET, na aba **Date**, escolha **Curvas (Curves)** e clique no botão adicionar (**Add**).
- No editor de curvas, defina bomba (**Pump**) no tipo de curva e entre com os pontos característicos estabelecidos anteriormente. A **Figura 88** ilustra o Editor de Curvas após o preenchimento dos dados.

Figura 88: Construindo a curva característica a partir do Editor de Curvas - Exercício 3.



Fonte: O autor

- Clique duas vezes sobre o desenho da bomba e abra a Tabela com as características específicas da bomba. Associe o número da curva criada no Editor de Curvas à bomba selecionada. A **Figura 89** ilustra o processo.

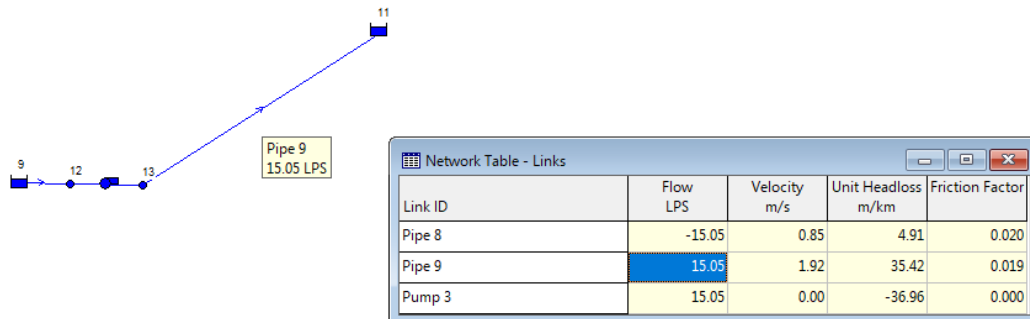
Figura 89: Associação do número da curva da bomba na tabela de características específicas da bomba.

Pump 3	
Property	Value
*Pump ID	3
*Start Node	12
*End Node	13
Description	
Tag	
Pump Curve	1
Power	
Speed	
Pattern	

Fonte: O autor

- Rode (**Run**) o modelo e verifique a vazão recalcada. A **Figura 90** ilustra o resultado do modelo.

Figura 90: Resultado da simulação do sistema de recalque - Exercício 3.



Fonte: O autor

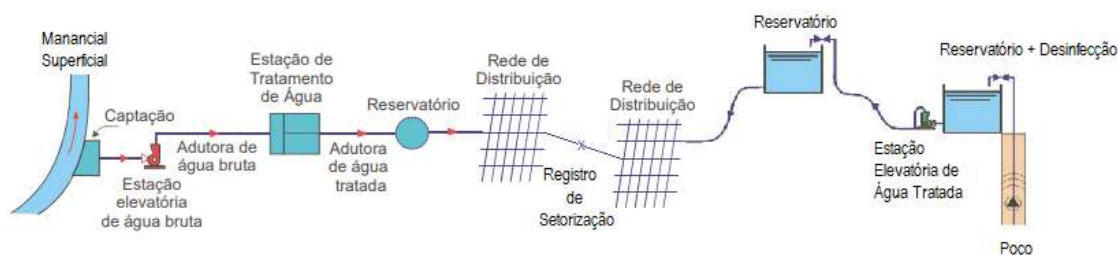
5 DESENHANDO E DIMENSIONANDO UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Neste capítulo, serão abordados os aspectos do desenho de um sistema de abastecimento no EPANET, assim como os critérios técnicos utilizados para o seu dimensionamento.

5.1 Características de um Sistema de Abastecimento de Água (SAA)

Um sistema de abastecimento de água (SAA) é formado por mananciais, estações elevatórias de água, tubulações, válvulas, estações de tratamento de água (ETA) e reservatórios, sendo responsável por fornecer ao consumidor, água em quantidade e qualidade em conformidade com os padrões de potabilidade exigidos. A **Figura 91** ilustra o esquema de um sistema de abastecimento de água.

Figura 91: Desenho esquemático de um sistema de abastecimento de água (SAA).



Fonte: TSUTIYA (2004).

- **Manancial:**

É a fonte de suprimento de água que será utilizada, após o tratamento, para ser consumida. O manancial poderá ser superficial (rios, lagos, reservatórios) ou subterrâneo (aquíferos).

Independentemente do tipo de manancial, toda água destinada ao consumo humano deve atender aos padrões de potabilidade exigidos pelas autoridades sanitárias. No Brasil, o Ministério da Saúde, através do ANEXO XX⁴ da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, estabeleceu os padrões de potabilidade (BRASIL, 2017).

Dessa maneira, dependendo do tipo do manancial e da qualidade da água em seu estado bruto, pode ser necessário maior ou menor grau de tratamento, mas **SEMPRE** atendendo aos padrões de potabilidade.

⁴ Quando da aplicação do curso, em meados do ano 2020, estava em vigor o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Essa portaria que trata dos padrões de potabilidade da água para consumo humano, foi alterada pela Portaria nº 888 de 4 de maio de 2021.

Por exemplo, a água extraída de um manancial subterrâneo poderá apresentar todos os parâmetros de qualidade em conformidade, exceto a temperatura (em geral, poços com profundidades superiores a 1000m apresentam temperatura elevada $\sim 60^{\circ}\text{C}$. Nesse caso, o tratamento pode ser o resfriamento da água ou; ou em um manancial superficial, em determinados períodos do ano, a turbidez da água pode atingir valores elevados ($\sim 1.000\text{uT}$) e com isso ser necessário tratamento de ciclo completo; ou, toda água proveniente de um manancial superficial deve passar por um sistema de filtração, já a água proveniente de um manancial subterrâneo é filtrada pela percolação no extrato rochoso e no pré-filtro do poço.

Esses breves exemplos servem para lembrar que cada captação de água bruta deve ter um tratamento adequado e de acordo com as características apresentadas.

- **Captação:**

É a estrutura composta por obras civis, responsáveis por captar, pré-tratar a água do manancial.

- **Sistema de adução de água bruta:**

É a estrutura responsável por conduzir a água da captação até a unidade de tratamento propriamente dita. No caso de uma captação localizada em cota superior a cota de implantação de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) a condução pode ser feita por gravidade, quando essa situação não é possível, empregam-se bombas para realização do recalque até o local de tratamento.

- **Tratamento da água bruta:**

É a etapa responsável por condicionar a água aos padrões de potabilidade exigidos. Dessa maneira, a tipologia do tratamento de água está interligada às características da água bruta captada. Por exemplo: em alguns mananciais subterrâneos, a estrutura geológica do poço, confere a água características que estão plenamente de acordo com os critérios de potabilidade, sendo necessária apenas a realização da desinfecção; já para mananciais superficiais, são necessárias outras etapas de tratamento além da desinfecção, como a coagulação, floculação, decantação e/ou filtração.

- **Sistemas de adução de água tratada:**

É a estrutura responsável pelo transporte da água tratada de um ponto a outro do sistema de abastecimento. A diferença em relação ao sistema de adução de água bruta é que este transporta a água bruta, ou seja, não potável, e o sistema de adução de água tratada transporta água em condição de consumo.

- **Reservação:**

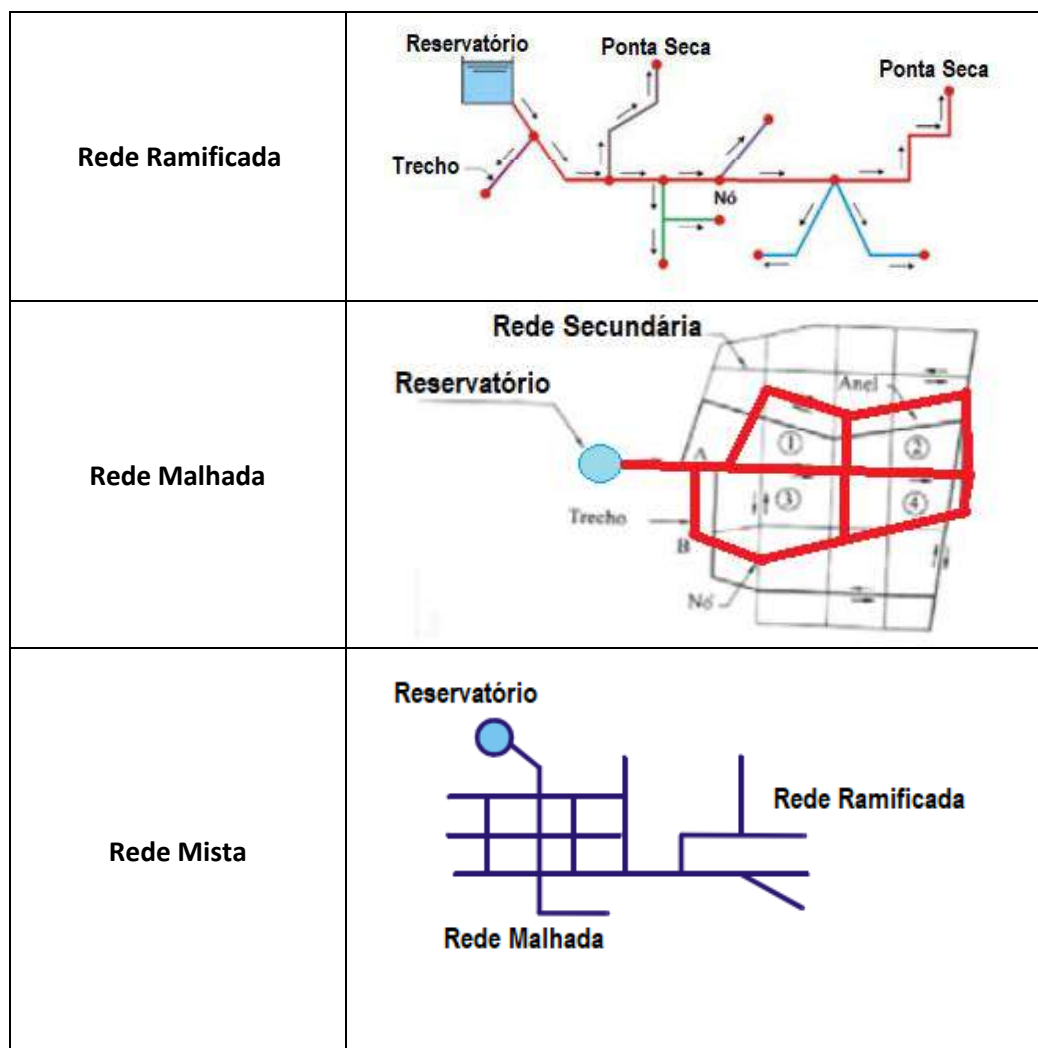
Refere-se à estrutura para armazenamento temporário de água, com a finalidade de garantir reserva para os horários de maior demanda de consumo, estabelecer limites de pressão à rede de distribuição e para conter reserva para combate a incêndios.

- **Rede de distribuição:**

É o conjunto de válvulas e tubulações responsáveis por conduzir a água potável até o consumidor, de maneira a não permitir alterações da qualidade da água que possa colocar o consumidor em situação de risco de contaminação.

De maneira geral, as redes de distribuição podem ser classificadas como redes **ramificadas, malhadas ou mistas**. A **Figura 92** ilustra os tipos de redes de distribuição de água:

Figura 92: Classificação das redes de distribuição de água segundo sua topologia.



Fonte: Adaptado de TSUTIYA (2004).

As redes de distribuição de água podem também ser classificadas segundo sua “importância” em redes primárias e secundárias.

As redes primárias são as redes, ou trechos de rede, principais, que distribuem a vazão para os demais trechos (um reservatório sempre está ligado a uma rede primária). Quando o sistema de distribuição possui uma gama de diâmetros, pode-se dizer que as redes principais são aquelas com diâmetro igual ou superior a DN150.

Já as redes, ou trechos de rede, secundários, são os trechos estão ligados às ligações prediais dos imóveis. Em geral é formada por trechos de menor diâmetro, normalmente variando de DN50 a DN 100.

5.2 Modelando unidades de um SAA no EPANET

Na seção **2.2** foram descritas as formas para modelagem da vazão em um nó, a criação de padrões, caracterização das curvas da bomba, de perda de carga, de volume, entre outros.

Nesta seção, serão apresentadas as formas para se modelar, no EPANET, algumas unidades ou equipamentos específicos utilizados nas redes de distribuição de água.

Deve-se ter em mente que, no processo de modelagem, algumas vezes, é feito o uso de ferramentas, disponibilizadas pelo software, que embora não existam fisicamente na unidade que está sendo modelada, o efeito proporcionado na simulação é o adequado. Por exemplo: um registro de gaveta instalado na ponta seca de um trecho de uma rede de distribuição de água. Quando se abre o registro de gaveta, a pressão, nesse ponto, iguala-se a pressão atmosférica; para modelá-la, é comum usar uma válvula redutora de pressão (**PRV**) igualando-se a pressão de jusante a zero.

Feitas as abstrações, é hora de modelar alguns componentes do sistema de abastecimento de água.

5.2.1 Modelando um hidrante urbano de Coluna

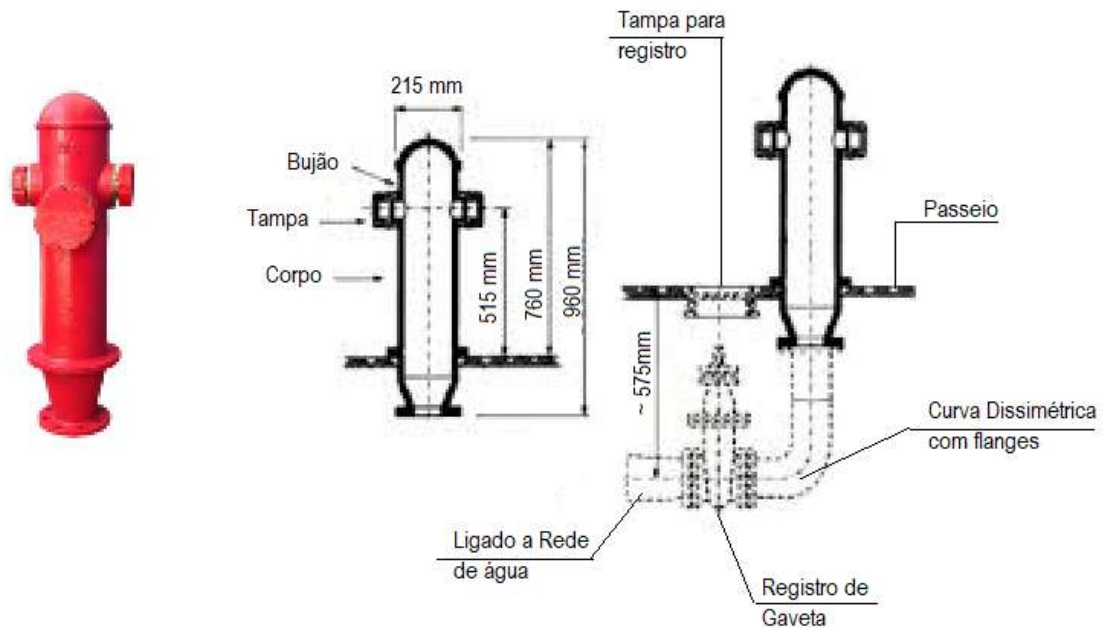
Um hidrante urbano de coluna é um dispositivo destinado ao combate a incêndio e é normalmente instalado no passeio (calçadas) e é conectado diretamente à rede de distribuição de água.

Geralmente, o hidrante urbano de coluna é constituído por um registro de gaveta (DN75), curva dissimétrica flangeada, cuja entrada possui DN75 e a saída, ligada ao hidrante, possui DN100, e o hidrante de coluna propriamente dito.

A

Figura 93 ilustra um hidrante de coluna, assim como apresenta o esquema de ligação desse dispositivo à rede de distribuição de água:

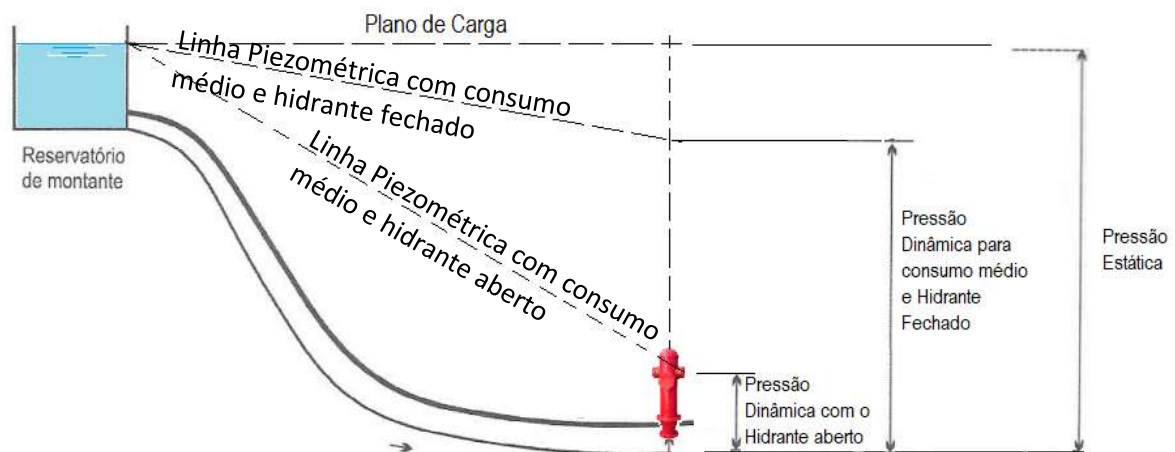
Figura 93: Características físicas e visuais de um hidrante urbano de coluna.



Fonte: Adaptado de BARBARÁ (1998).

A **Figura 94** ilustra as linhas piezométricas e as pressões (dinâmicas) na rede com o hidrante fechado e aberto:

Figura 94: Linhas piezométricas em função da situação operacional do hidrante.



Fonte: O autor

Ao observarmos a **Figura 94** percebemos que, ao abrir a tampa do hidrante de coluna, a linha piezométrica desloca-se para baixo, provocando a diminuição da pressão interna ao hidrante.

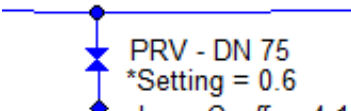
Como as pressões nas redes de distribuição são determinadas a partir das cotas do terreno, supõe-se que a pressão no interior do hidrante, quando aberto, seja, aproximadamente o desnível entre o passeio e a tampa, considerado aqui, aproximadamente igual a 0,60 mH₂O.

As perdas de carga localizadas associadas ao hidrante foram estimadas como tendo $\sum K = 4,1$, referente a um **tê** de saída lateral (ligação entre rede e trecho do hidrante), curva de raio curto, válvula gaveta aberta e saída do hidrante.

Com base nessas premissas, a construção do modelo empregando uma válvula redutora de pressão (**PRV**) ao invés de um registro de gaveta (**TCV**) estabelece uma condição de contorno, no caso a pressão na base do hidrante, que permitirá estabelecer a vazão de descarga em função da carga de pressão existente na rede e do diâmetro da rede de distribuição de água, ao qual o hidrante de coluna está ligado.

A **Figura 95** ilustra a modelagem de um hidrante urbano de coluna no EPANET:

Figura 95: Modelagem do hidrante urbano de coluna no EPANET.

Tê saída Lateral DN XX - dn 75  PRV - DN 75 *Setting = 0.6 Loss Coeff. = 4.1 HIDRANTE Emitter Coeff. = 1700	Valve 11 <table><tr><th>Property</th><th>Value</th></tr><tr><td>*Start Node</td><td>15</td></tr><tr><td>*End Node</td><td>17</td></tr><tr><td>Description</td><td></td></tr><tr><td>Tag</td><td></td></tr><tr><td>*Diameter</td><td>75</td></tr><tr><td>*Type</td><td>PRV</td></tr><tr><td>*Setting</td><td>0.6</td></tr><tr><td>Loss Coeff.</td><td>4.1</td></tr><tr><td>Fixed Status</td><td>None</td></tr></table>	Property	Value	*Start Node	15	*End Node	17	Description		Tag		*Diameter	75	*Type	PRV	*Setting	0.6	Loss Coeff.	4.1	Fixed Status	None	Junction 17 <table><tr><th>Property</th><th>Value</th></tr><tr><td>Description</td><td></td></tr><tr><td>Tag</td><td></td></tr><tr><td>*Elevation</td><td>0</td></tr><tr><td>Base Demand</td><td>0</td></tr><tr><td>Demand Pattern</td><td></td></tr><tr><td>Demand Categories</td><td>1</td></tr><tr><td>Emitter Coeff.</td><td>1700</td></tr><tr><td>Initial Quality</td><td></td></tr><tr><td>Source Quality</td><td></td></tr></table>	Property	Value	Description		Tag		*Elevation	0	Base Demand	0	Demand Pattern		Demand Categories	1	Emitter Coeff.	1700	Initial Quality		Source Quality	
Property	Value																																									
*Start Node	15																																									
*End Node	17																																									
Description																																										
Tag																																										
*Diameter	75																																									
*Type	PRV																																									
*Setting	0.6																																									
Loss Coeff.	4.1																																									
Fixed Status	None																																									
Property	Value																																									
Description																																										
Tag																																										
*Elevation	0																																									
Base Demand	0																																									
Demand Pattern																																										
Demand Categories	1																																									
Emitter Coeff.	1700																																									
Initial Quality																																										
Source Quality																																										
(a) Representação do hidrante no EPANET	(b) Características específicas da PRV	(c) Característica específica do nó referente ao hidrante																																								

Fonte: O autor

5.2.2 Modelando um registro de descarga/limpeza da rede

Todo o trecho de rede de distribuição que é interrompido, não formando um anel fechado, é denominado ponta seca. Nesses pontos, de tempos em tempos, é comum acumular resíduos (partículas coloidais), já que a velocidade de escoamento na tubulação é nula, favorecendo a deposição desse material. Quando isso ocorre, a equipe de operação é acionada para realizar a descarga da rede nesse ponto a fim de limpá-la.

Ainda, segundo ABNT (2017), nos pontos baixos da rede de distribuição de água, deve-se prever registro de descarga a fim de permitir a limpeza da rede (item 5.11.2.1 da NBR 12.218:2017), devendo-se tomar cuidados de forma a não permitir o retorno e a entrada de água de descarga para o interior da rede (item 5.11.2.2 da NBR 12.218:2017).

O diâmetro do registro de descarga/limpeza deve ser igual ou superior a DN50.

Assim, da mesma maneira como foi modelado o hidrante urbano de coluna, adota-se uma válvula redutora de pressão (PRV), com a pressão de jusante nula e coeficiente de perda de carga ($K=0,20$), tendo o nó de jusante o coeficiente de emissão (**Emitter Coeff**) de 1700.

A **Figura 96** ilustra a modelagem de um registro de descarga/limpeza no EPANET:

Figura 96: Modelagem de um registro de descarga/limpeza no EPANET.

PRV - DN 50 ou superior Loss Coeff.=0.20 ◆◆◆ Emitter Coeff. = 1700 REGISTRO DE DESCARGA/LIMPEZA	Valve 12 <table><tr><th>Property</th><th>Value</th></tr><tr><td>*Valve ID</td><td>12</td></tr><tr><td>*Start Node</td><td>16</td></tr><tr><td>*End Node</td><td>18</td></tr><tr><td>Description</td><td></td></tr><tr><td>Tag</td><td></td></tr><tr><td>*Diameter</td><td>50</td></tr><tr><td>*Type</td><td>PRV</td></tr><tr><td>*Setting</td><td>0</td></tr><tr><td>Loss Coeff.</td><td>0.2</td></tr></table>	Property	Value	*Valve ID	12	*Start Node	16	*End Node	18	Description		Tag		*Diameter	50	*Type	PRV	*Setting	0	Loss Coeff.	0.2	Junction 18 <table><tr><th>Property</th><th>Value</th></tr><tr><td>Description</td><td></td></tr><tr><td>Tag</td><td></td></tr><tr><td>*Elevation</td><td>0</td></tr><tr><td>Base Demand</td><td>0</td></tr><tr><td>Demand Pattern</td><td></td></tr><tr><td>Demand Categories</td><td>1</td></tr><tr><td>Emitter Coeff.</td><td>1700</td></tr><tr><td>Initial Quality</td><td></td></tr><tr><td>Source Quality</td><td></td></tr></table>	Property	Value	Description		Tag		*Elevation	0	Base Demand	0	Demand Pattern		Demand Categories	1	Emitter Coeff.	1700	Initial Quality		Source Quality	
Property	Value																																									
*Valve ID	12																																									
*Start Node	16																																									
*End Node	18																																									
Description																																										
Tag																																										
*Diameter	50																																									
*Type	PRV																																									
*Setting	0																																									
Loss Coeff.	0.2																																									
Property	Value																																									
Description																																										
Tag																																										
*Elevation	0																																									
Base Demand	0																																									
Demand Pattern																																										
Demand Categories	1																																									
Emitter Coeff.	1700																																									
Initial Quality																																										
Source Quality																																										
a) Representação do hidrante no EPANET	b) Características específicas da PRV	c) Característica específica do nó referente ao hidrante																																								

Fonte: O autor

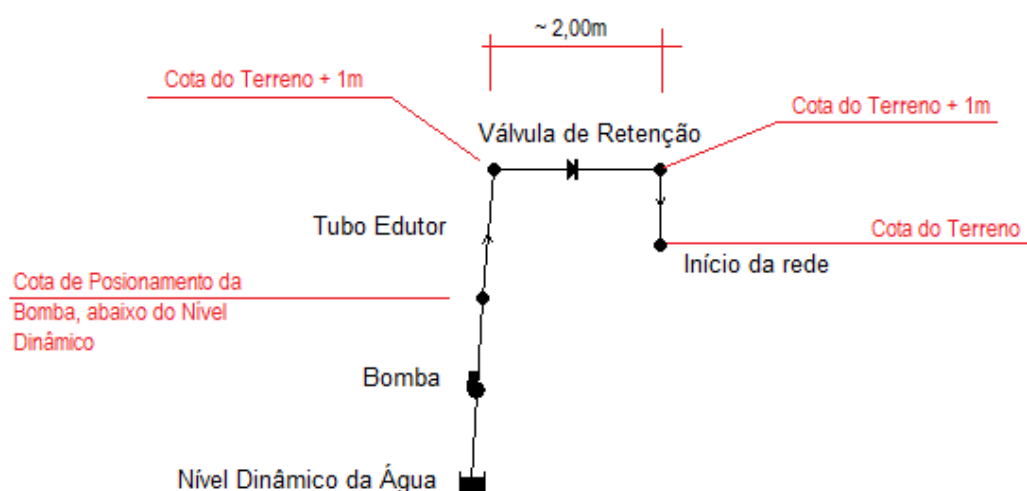
5.2.3 Modelando o bombeamento de um poço profundo

Para modelar um poço profundo, basta representar um reservatório de nível constante (RNC), cujo nível dinâmico d'água é igual a cota piezométrica (**Total Head**), inserindo, na sequência, uma bomba e um trecho de tubulação com uma válvula de retenção.

A

Figura 97 ilustra a modelagem de um poço profundo.

Figura 97: Modelagem de um poço profundo no EPANET.



Fonte: O autor

O leitor deve lembrar-se de definir a curva da bomba nas *Características Não Físicas* e associar a identificação da curva às Características Específicas da bomba.

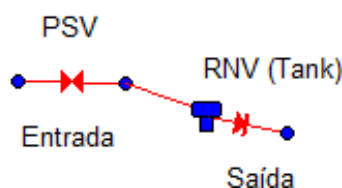
5.2.4 Modelando um RNV com entrada superior ao nível máximo de água

Quando um determinado trecho de alimentação é ligado a um reservatório de nível variável - RNV (**Tank**), faz com que o nível de água no interior do reservatório exerça pressão na tubulação de alimentação, fazendo com que o desnível geométrico seja alterado e, com isso, a vazão de alimentação sofra alteração.

Para simular a entrada de alimentação de um RNV acima do nível máximo de água, basta estabelecer uma Válvula Sustentadora de Pressão (**PSV**), estabelecendo em ***Setting** uma medida igual a altura máxima de água, acrescida de 0,30m; seguida por um trecho de tubulação com pequeno comprimento (~1,00m) e, estabelecendo na saída do RNV um trecho com válvula de retenção e diâmetro compatível com o trecho de alimentação da rede de distribuição de água.

A **Figura 98** ilustra a modelagem de um RNV com entrada superior ao nível máximo de água:

Figura 98: Modelagem de um RNV com entrada superior ao nível máximo de água.



Fonte: O autor

5.2.5 Simulando origens de vazão ou pontos de ligações a outros sistemas

Algumas vezes, seja pelo tamanho do sistema de abastecimento, seja por simplificação do modelo, faz-se necessário simular a origem de vazão para o modelo que está sendo desenvolvido.

Para esses casos, substitua as origens dessas vazões (reservatórios, bombas, etc) por nós e insira o valor da vazão originária como consumo de água (**Base Demand**), porém com o sinal negativo.

No entanto, essa técnica é válida apenas se houver, ao menos, um reservatório (**Reservoir ou Tank**) no modelo que está sendo desenvolvido, pois, do contrário, o EPANET emitirá uma mensagem de erro.

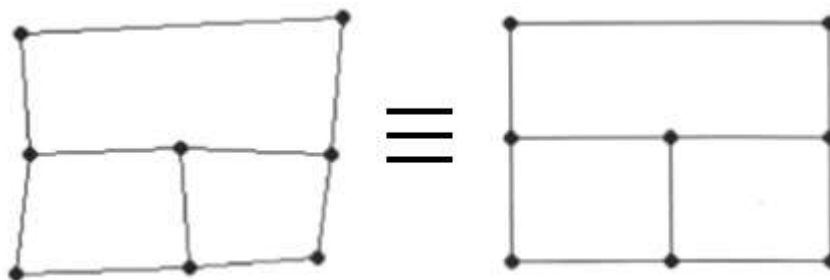
5.3 Desenhando um sistema de abastecimento de água

Vale lembrar que antes de se iniciar qualquer projeto no EPANET, faz-se necessário estabelecer as condições padrão (**Default**) que serão usadas nos cálculos, conforme discutidos na seção 3.1.

Embora a determinação dos diâmetros dos trechos seja discutida mais a frente, é importante estabelecer como padrão (**Project >>> Defaults >>> aba Properties**) que o diâmetro da tubulação seja 51.8mm, que representa o diâmetro interno da tubulação em PVC com DN50. Na seção 5.4.2 serão dados mais detalhes.

Após o desenvolvimento do primeiro projeto no EPANET, o leitor deverá ter percebido que o EPANET interpreta o desenho como se fosse um croqui e nunca como um desenho em escala. Para efeitos práticos, os dois croquis apresentados na **Figura 99** representam a mesma rede de distribuição:

Figura 99: Equivalência entre os traçados de uma rede de distribuição de água.



Fonte: O autor

Assim, para traçar uma rede de distribuição de água no EPANET, pode-se fazê-lo de três maneiras diferentes:

- Unindo nó (**Junction**) a nó e editando, individualmente, cada um dos trechos, alterando o comprimento e as demais propriedades de cada trecho, como temos feito até o momento;
- Importando dados parciais da rede de distribuição a partir de programas externos, tipo CAD ou GIS;
- Inserindo um mapa escalado e desenhando sobre ele.

Obviamente, a importação de uma rede, ou a inserção de um mapa e o traçado da rede empregando o comando **Auto Lenght (Projects >>> Default >> aba Properties)** economiza tempo em relação à opção de unir nó a nó alterando manualmente as demais propriedades de cada trecho.

5.3.1 Importando dados parciais de uma rede

- A partir de arquivo .MAP

O EPANET permite a importação da descrição geométrica da rede em um arquivo texto simples, com extensão **.MAP**.

Este arquivo texto contém os identificadores (ID) e as coordenadas dos nós no mapa, os identificadores e os nós de extremidade dos trechos, assim como pontos de vértice intermediários associados aos trechos.

Um arquivo de uma rede parcial deve ter o seguinte formato, onde o texto entre parênteses (<>) descreve o tipo de informação que deve aparecer nessa linha do arquivo:

```
[TITLE]
<descrição opcional do arquivo>
[JUNCTIONS]
<Identificador de cada nó>
[PIPES]
<Identificador de cada tubulação seguido dos
Identificadores dos nós de extremidade>
[COORDINATES]
<ID do nó e as respectivas coordenadas X e Y>
[VERTICES]
<ID da tubulação e as coordenadas X e Y de um ponto
de vértice intermediário
(utilize uma linha para cada vértice)>
```

É importante notar que apenas os nós e as tubulações são representados. Outros elementos da rede, como os reservatórios e as bombas, podem ser importados como nós ou tubulações e convertidos posteriormente ou, simplesmente, adicionados.

- **A partir de arquivo .dxf com uso de software externo**

Softwares do tipo CAD, permitem salvar seus arquivos em formato **.dxf**.

Nesses caso, faz-se necessário o emprego de software externo que converta o arquivo **.dxf** em arquivo **.inp**, o qual pode ser lido pelo EPANET.

Um exemplo de software que faz a leitura do arquivo **.dxf** e converte em arquivo **.inp** é o **EPACad**, desenvolvido pela *Universitat Politècnica de València* e disponibilizado, gratuitamente, pelo endereço: < <https://www.epacad.com/epacad-en.php>>, cuja sequência é apresentada na *Erro! Fonte de referência não encontrada.*:

Figura 100: Sequência para criação de arquivo .INP a partir de arquivo .DXF



Fonte: O autor

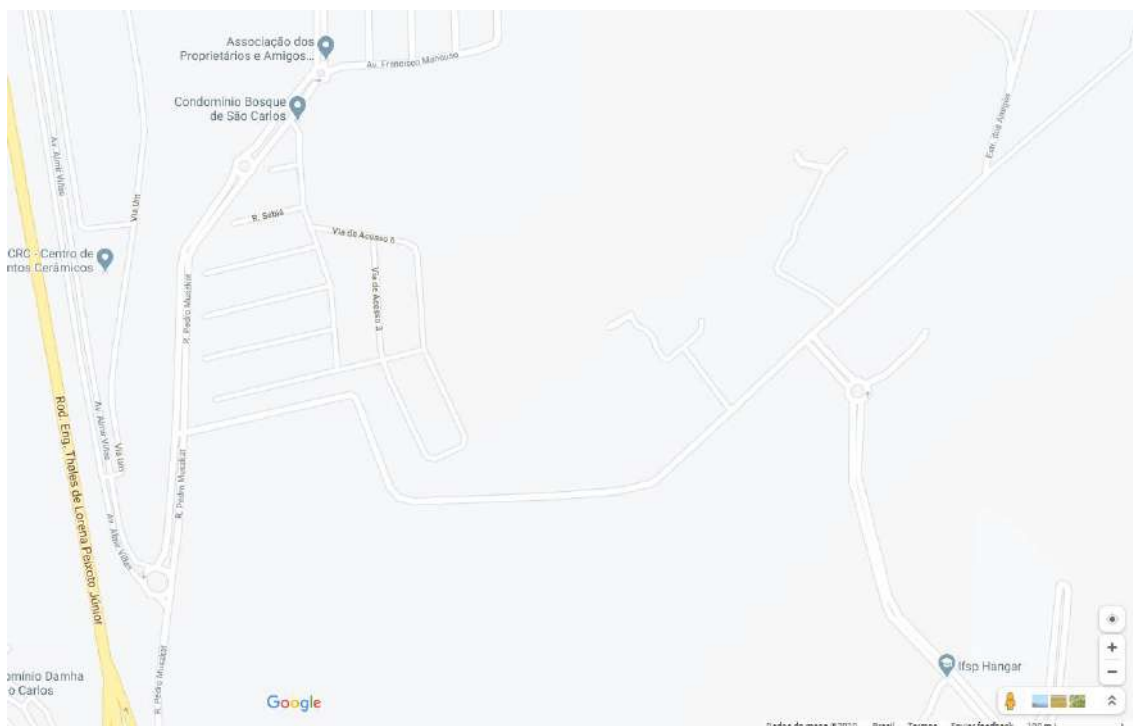
5.3.2 Inserindo e Escalando um Mapa na tela do EPANET

Muitas vezes, para traçar uma rede de água no EPANET, por exemplo, é mais fácil fazê-la sobre um desenho prévio.

Nesta seção, será mostrado como fazer a inserção de um mapa e escalá-lo para desenhar um sistema de abastecimento.

A **Figura 100** ilustra o mapa que será introduzido na tela de fundo do EPANET:

Figura 100: Tela capturada do **GoogleMaps**.



Fonte: Google.

Vale mencionar que o mapa apresentado na **Figura 100** foi capturado do dispositivo **GoogleMaps** e salvo como um arquivo **“.bmp”** (Bitmap de 24 bits).

O EPANET trabalha com arquivos de imagem com extensão **“.bmp”**. Em geral, uma mesma imagem no formato **“.bmp”** chega a exigir 11 vezes mais memória que o mesmo arquivo na extensão **“.jpg”**.

Assim, deve-se evitar o uso de grandes imagens para resultar em um arquivo demasiadamente grande.

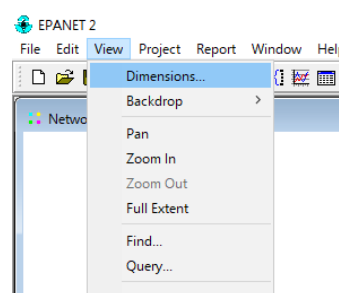
Por hora, é necessário que observe e anote a escala (**E**) do desenho que será inserido no EPANET. A **Figura 101** apresenta, de maneira ampliada, a escala do mapa:

Figura 101: Verificação da escala (E) do mapa.



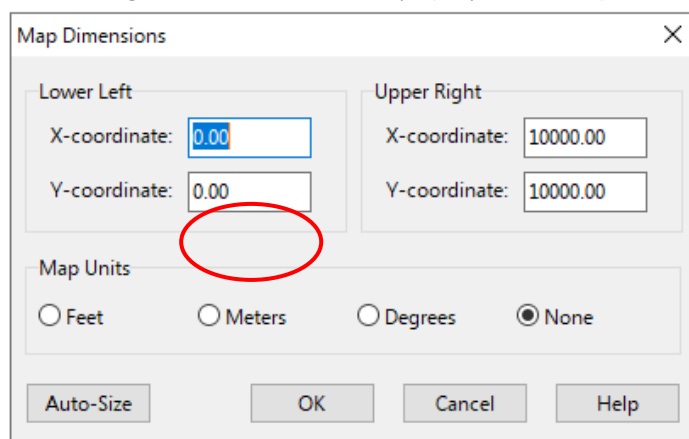
Fonte: Adaptado do Google.

Na barra de Menu, selecione **View >>> Dimensions...**



Aparecerá no monitor uma tela das dimensões do mapa (**Map Dimensions**), conforme mostrado na

Figura 102: Dimensões do Mapa (Map Dimensions).



Fonte: autor

No quadro **Map Dimensions**, apresentado na
 , é possível observar as coordenadas (X,Y) dos pontos inferior esquerdo do mapa e superior direito do mapa, assim como a unidade da escala (pé, metros, graus ou sem escala).

As coordenadas (X,Y) dos pontos de referências apresentadas na
, são padrões do EPANET [(0;0), (10000;10000)] e será mantido assim por enquanto.

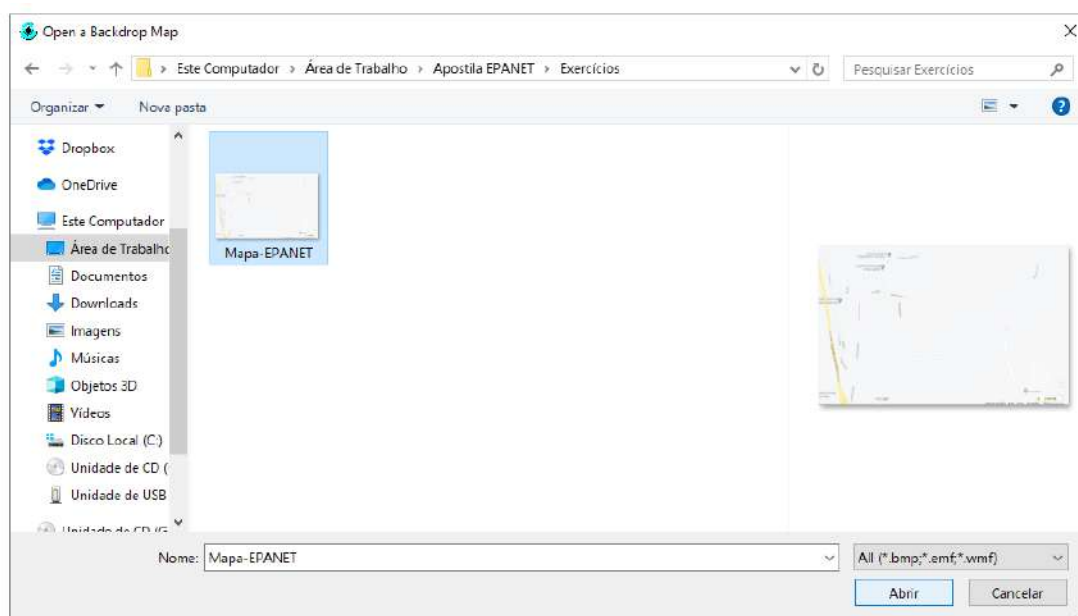
Selecione a opção **Meters**, já que as leituras do mapa serão feitas em metros. Não se esqueça de fazer esta alteração antes de inserir o mapa!

Na barra de Menu, selecione **View >>> Backdrop >>> Load**



Surgirá uma tela para que possa ser selecionado o arquivo com extensão **.bmp** desejado. Selecione-o e clique em **“Abrir”**, conforme ilustrado pela **Figura 103**.

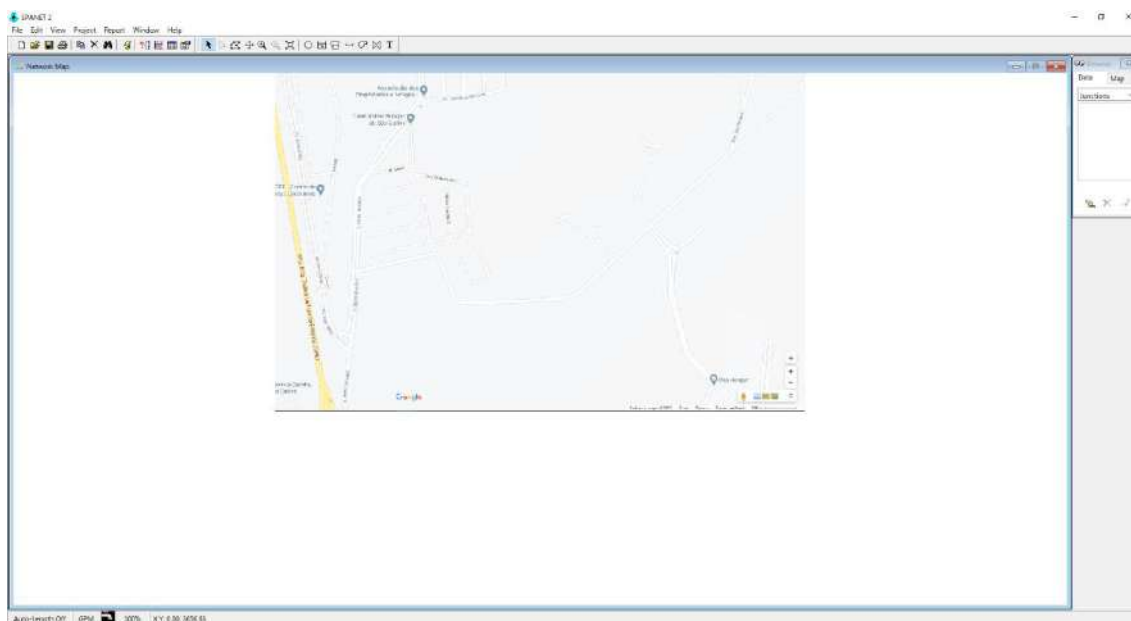
Figura 103: Abrindo um **Backdrop Map**.



Fonte: O autor

O mapa escolhido será inserido na tela de fundo do EPANET, conforme mostrado na **Figura 104**.

Figura 104: Mapa inserido na tela de fundo do EPANET.

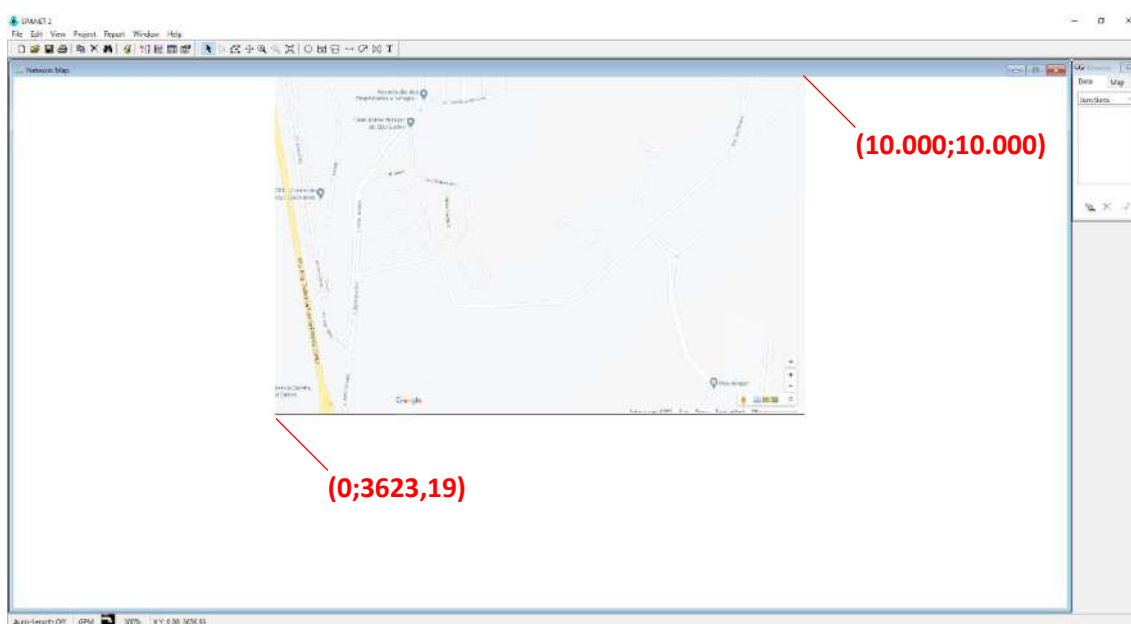


Fonte: O autor

É importante ressaltar que ao inserir o mapa no EPANET, ele é autoescalado de acordo com a proporção do mapa e da região determinada pelas coordenadas (X, Y), tomando, como base, as coordenadas do ponto superior direito.

Ao posicionar o mouse sobre os cantos inferior esquerdo e superior direito do mapa, para o arquivo usado como exemplo, as coordenadas serão conforme apresentadas na **Figura 105**.

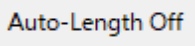
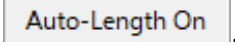
Figura 105: Coordenadas do mapa após inserção no EPANET.



Fonte: O autor

Note que o mapa inserido, manteve sua proporção, porém em uma escala diferente daquela original.

Para ajustar a escala, faz-se necessário os procedimentos a seguir:

Leve o mouse até o canto inferior esquerdo do EPANET e com o botão direito do mouse, altere o formato **Auto-Lenght Off** para **Auto-Lenght On**  .

Insira um nó em cada extremidade da linha de escala e lance um trecho de tubulação entre esses nós (esta estrutura é temporária!). Talvez você precise aplicar o Zoom (+ ou -)   para melhor visualização.

Traçada a estrutura temporária, selecione **Select Objects**  no menu de comandos EPANET e clique duas vezes sobre o trecho de tubulação lançado. Nesse momento, aparecerá as características do trecho. Anote o comprimento (L) lido. A **Figura 106** ilustra o resultado obtido e a janela com as características do trecho temporário construído.

Figura 106: Características do trecho de tubulação implantado temporariamente.



Fonte: O autor

Para o exemplo em questão, o comprimento lido foi $L=1936,45\text{ m}$.

Apague os dois nós e o trecho de tubulação que formam a estrutura temporária.

De posse da coordenada X do canto superior direito, da escala E do mapa e do comprimento L lido a partir da tubulação temporária, faz-se necessário calcular o valor de X^* corrigido, empregando a Equação 06:

$$X^* = \frac{X \cdot E}{L} \quad (06)$$

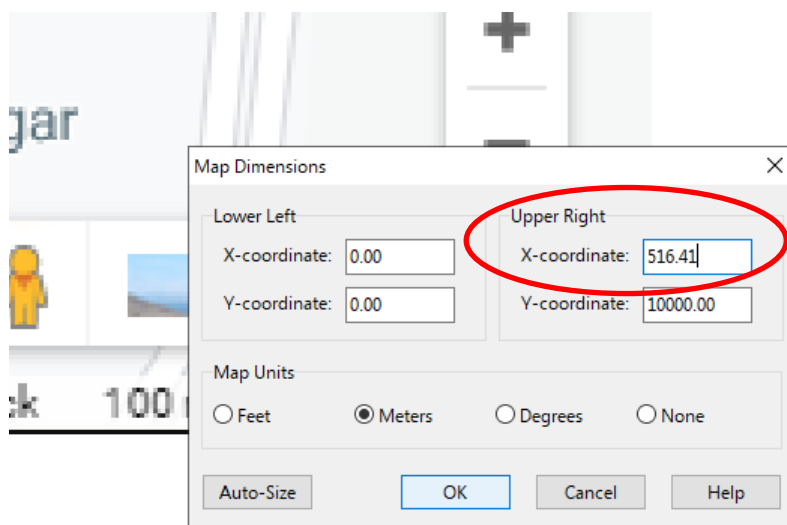
Para o exemplo utilizado, tem-se:

$$X^* = \frac{10000 \cdot 100}{1936,45} = 516,41$$

Volte em **Map Dimensions** e altere a coordenada X do canto superior direito para 516,41 (lembre-se que o EPANET usa unidades de medida americana, portanto, 516.41).

A **Figura 107** ilustra o procedimento de correção da coordenada X do ponto localizado no canto superior direito.

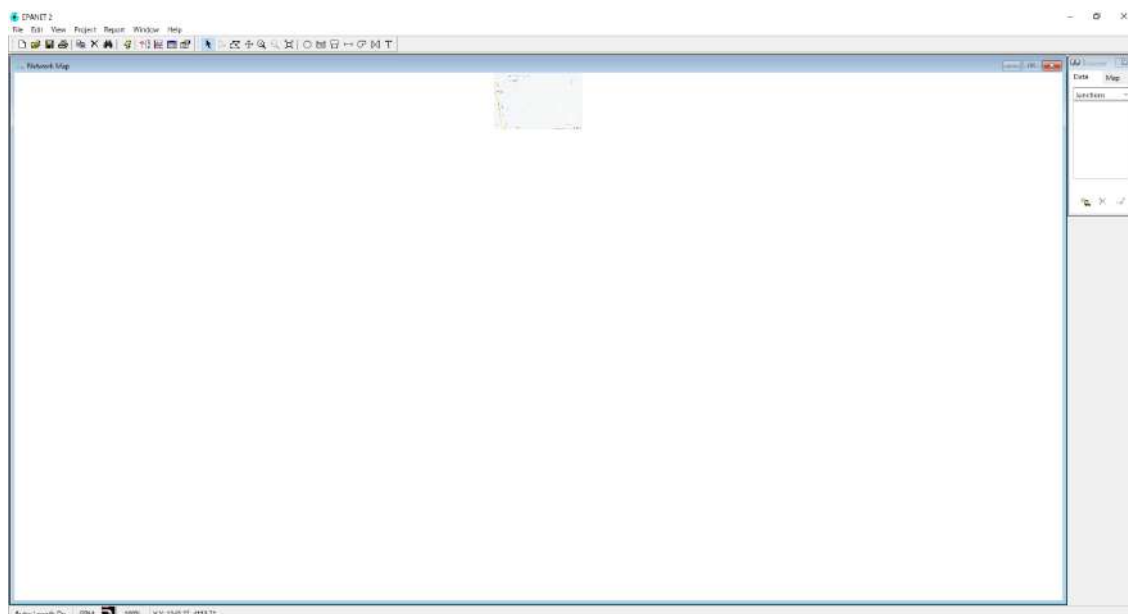
Figura 107: Correção da coordenada X do canto superior direito em **Map Dimensions**.



Fonte: O autor

Ao selecionar **OK**, a tela do EPANET apresentará o mapa já escalado, o que pode resultar em uma aparência inicial, diferente de quando o mapa foi inserido. A **Figura 108** ilustra o redimensionamento do mapa utilizado no exemplo.

Figura 108: Redimensionamento do mapa na tela do EPANET.

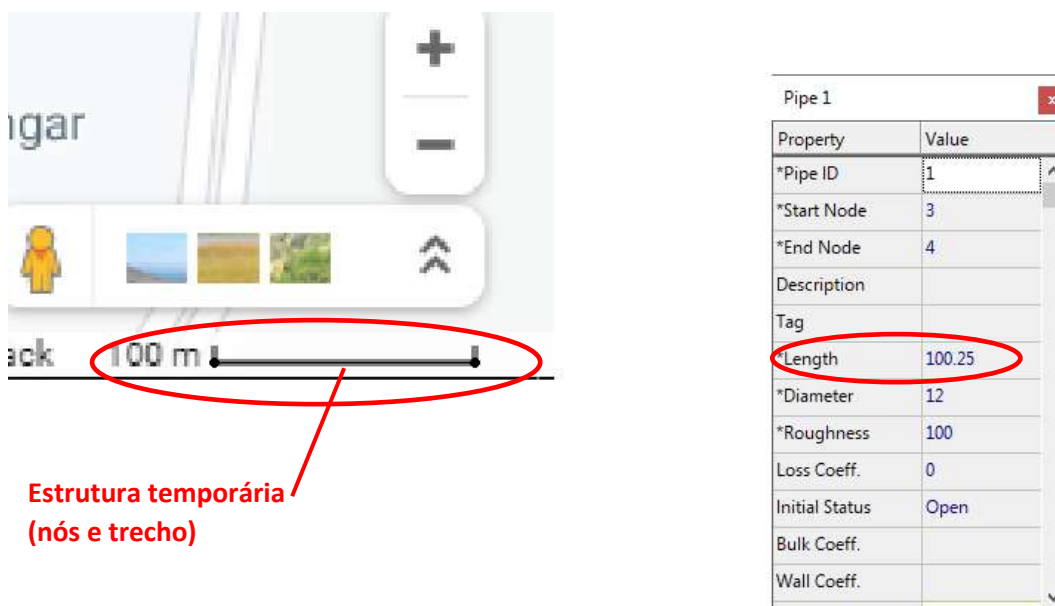


Fonte: O autor

Apenas para confirmar o escalonamento do mapa, volte à posição da escala, construa sobre ela a estrutura temporária e observe o comprimento obtido.

A **Figura 109** ilustra o comprimento obtido para a estrutura temporária após o escalonamento do mapa inserido:

Figura 109: Conferência da escala do mapa após reescalonamento.



Fonte: O autor

Ao observarmos a **Figura 109**, é possível verificarmos que a escala indicativa de 100m no mapa resultou em comprimento de 100,25m. A diferença de alguns centímetros é aceitável e perfeitamente normal.

Com o mapa corretamente escalonado, apague a estrutura temporária.

Pronto, seu mapa já poderá ser utilizado para o traçado de uma rede de distribuição.

Não se esqueça de salvar o arquivo!

5.3.3 Traçando uma rede de distribuição de água com o Auto-Lenght

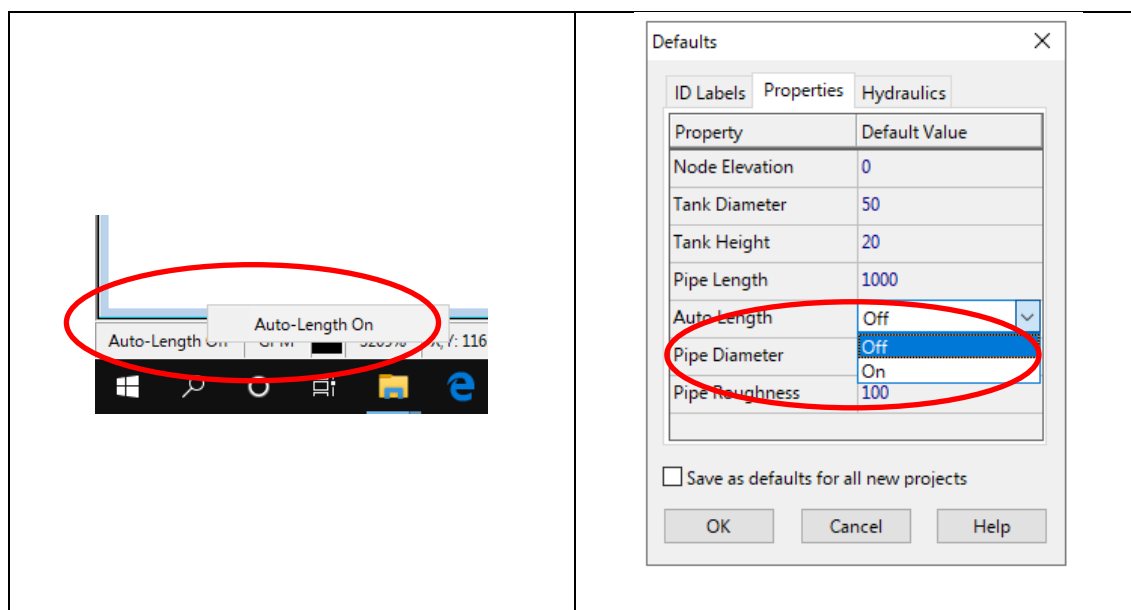
Caso o leitor tenha importado a rede de distribuição, os comprimentos dos trechos terão sido transportados para o EPANET, bastando ao usuário verificar se os nós vieram com as devidas cotas de seus arquivos de origem.

Caso o arquivo *.INP* utilizado não tenha as cotas de elevação dos nós, o leitor precisará editar nó por nó e incluir as cotas de elevação, ou preencher a partir da edição do arquivo *.INP*, conforme apresentado na seção **5.3.4**.

Porém, caso o leitor vá desenhar o sistema de abastecimento de água sobre uma planta escalonada, ele precisará usar o comando **Auto Lenght**.

O comando **Auto Lenght** é muito útil para se trabalhar com mapas, já que permite obter os comprimentos dos trechos de maneira automática. Para usar essa função o usuário do EPANET pode levar o mouse até o canto inferior esquerdo da tela e, com o botão direito do mouse selecionar **Auto Lenght: On** ou pela barra de menu em **Project >>> Defaults >>>** escolhendo a aba **Properties**, conforme mostrado na **Figura 110**.

Figura 110: Ativando a função **Auto Lenght**.



Fonte: autor

Após a ativação do comando **Auto Length**, o usuário poderá traçar a rede sobre o mapa ou figura. Uma vez que a figura esteja escalada, os comprimentos estabelecidos pelo EPANET, ao determinar cada trecho, são válidos para o modelo, não sendo necessário entrar nas características específicas dos trechos e alterar o comprimento manualmente.

É importante mencionar que, caso algumas das características dos trechos sejam comuns, por exemplo, rugosidade, diâmetro, etc., poderão ser alterados esses parâmetros estabelecidos no padrão (Default) usado pelo EPANET (na barra de menu: **Project >>> Defaults >>> aba Properties**).

A

Figura 111 ilustra o desenho de uma rede de distribuição de água sobre um mapa escalado empregando o comando **Auto Length**.

Figura 111: Traçando uma rede de distribuição de água sobre um mapa escalado.

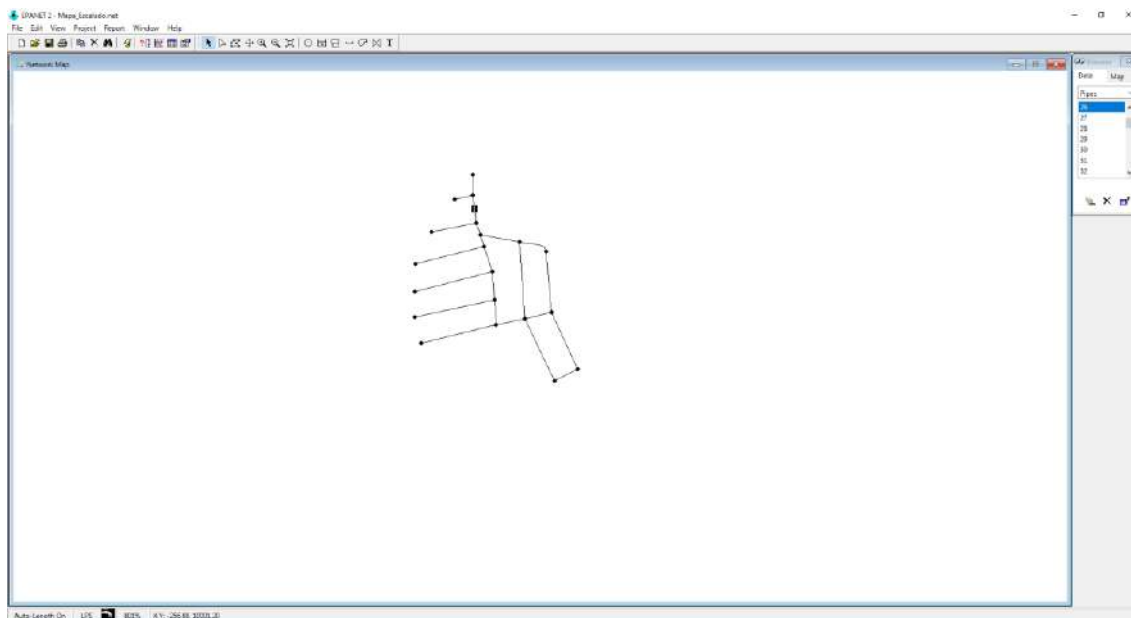


Fonte: O autor

Após o traçado da rede sobre o mapa, é aconselhável que a figura ou mapa sejam escondidos ou apagados, para que o arquivo não ocupe muita memória. Essa opção pode ser feita, iniciando na barra de menu: **View >>> Backdrop >>> Hide** ou **Unload**.

A **Figura 112** ilustra a rede de distribuição de água desenhada, tendo sido escondido (**Hide**) o mapa utilizado como referência:

Figura 112: Traçado da rede de distribuição de água com o mapa de referência escondido.



Fonte: O autor

5.3.4 Estabelecendo as cotas de elevação dos nós

Ao desenhar uma rede no EPANET é possível, como já foi mostrado, obter o comprimento automático dos trechos, estabelecer a rugosidade e pré-estabelecer os diâmetros dos trechos além de outras características.

Para os nós até é possível estabelecer uma cota de elevação prévia, (**Projects>>>Defaults>>>Properties**), mas ela será a mesma para cada nó.

Para alteração das cotas de elevação no EPANET, há duas possibilidades:

- a) clicando sobre cada nó e especificar a cota de elevação (**Elevation**);
- b) gerando, abrindo e alterando um arquivo **.INP**.

- a) **Alterando/Inserindo a cota de elevação de um nó a partir das características específicas:**

Para esta alternativa o leitor já deve estar acostumado. Caso necessário, reveja a seção **2.2.1.1**.

- b) **Alterando/Inserindo a cota de elevação de um nó a partir do arquivo **.INP**:**

Com a rede de distribuição lançada no EPANET, exporte a rede (**Network**), o que gerará um arquivo **.INP** (ver seção **2.5**). Salve o arquivo **.NET** e feche-o na sequência.

Com auxílio de um editor (**Bloco de Notas** do *Windows*), abra o arquivo **.INP** que foi gerado.

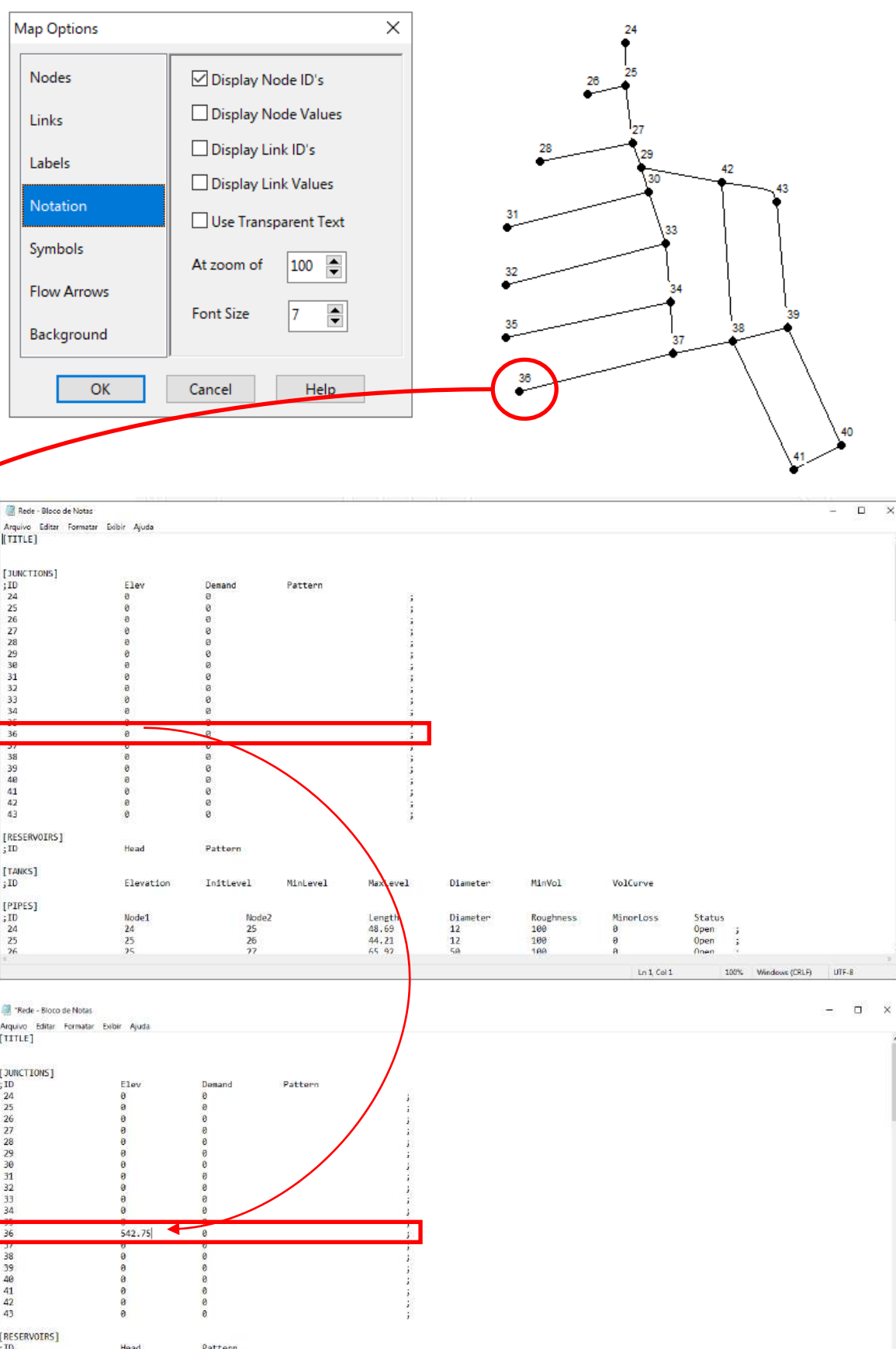
Para cada nó (**Junction**) identificado por seu respectivo ID, insira a cota de elevação para cada um dos nós, tomando o cuidado de não alterar a tabulação do arquivo. Ao terminar a inserção dos dados, salve o arquivo que está no **Bloco de Notas** com a mesma extensão **.INP**.

Volte ao EPANET e importe o arquivo **.INP** que acabou de ser alterado. Surgirá na tela do EPANET o desenho dos trechos e nós, só que agora contendo as alterações efetuadas.

Salve então o arquivo atualizado.

A **Figura 113** ilustra o processo de alteração das cotas de elevação através do arquivo **.INP**.

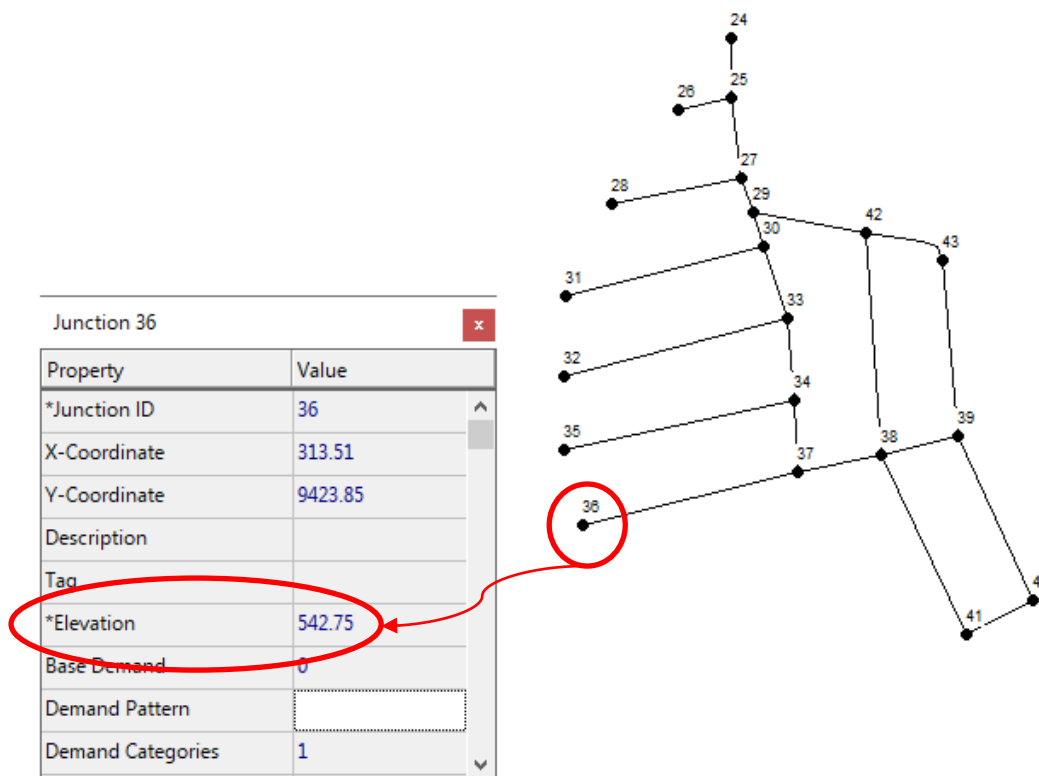
Figura 113: Alterando o arquivo .INP com a cota de elevação de um determinado nó.



Fonte: O autor

A **Figura 114** ilustra a verificação, na tabela de características específicas dos nós, da alteração da cota de elevação de um determinado nó da rede de distribuição de água a partir da alteração do arquivo **.INP**.

Figura 114: Verificação da alteração da cota de elevação de um determinado nó a partir da modificação do arquivo **.INP**.



Fonte: O autor

5.4 Dimensionando um Sistema de Abastecimento de Água

O termo Dimensionamento de um Sistema de Abastecimento de Água consiste, aqui, na determinação dos diâmetros das tubulações, das cotas mínimas de elevação dos reservatórios e na determinação dos volumes de armazenamento, uma vez que a topologia da rede já foi construída.

Para determinação dessas dimensões, faz-se necessário estabelecer a população de projeto e, conseqüentemente, as vazões demandadas, ambas determinadas a partir de parâmetros de projeto adotados por projetistas, ou exigidos pelas concessionárias dos serviços de água e/ou Normas Técnicas.

5.4.1 Estabelecimento dos Parâmetros de Projeto e Determinação das vazões características

- **Densidade populacional (DP):**

Refere-se ao número médio de habitantes por lote, unidade habitacional ou por ligação ativa de água.

No caso de projetos de sistemas de abastecimento de água para loteamentos ou condomínios horizontais é comum utilizar a densidade populacional de 5 habitantes/lote; já para o caso de simulações ou avaliações de sistemas de abastecimento de água de um município, por exemplo, por ser mais complexo, pode-se utilizar o número de pessoas por ligação. A cidade de São Carlos (SP), por exemplo, possui densidade populacional da ordem de 2,3 pessoas/ligação ativa de água.

- **População atendida (P):**

Refere-se ao conjunto de pessoas que serão diretamente atendidas pelo SAA. No caso de loteamentos e condomínios horizontais, por restringir-se a uma determinada área com uma única regra para o uso e ocupação do solo, normalmente é determinada multiplicando-se a densidade populacional (DP) pelo número de lotes (NL) do empreendimento, de acordo com a **Equação 07:**

$$P = DP \cdot NL \quad (07)$$

Para o caso de análise do SAA mais complexo, que envolve toda a cidade ou áreas com diferentes regras para o uso e ocupação do solo, faz-se necessário a realização de estudos do crescimento populacional por região.

- **Consumo médio *per capita* de água (q):**

Refere-se ao volume médio de água atribuído ao consumo de uma pessoa. O termo atribuído foi aqui aplicado, pois tal volume engloba as perdas físicas de água no sistema de abastecimento. Quando não se dispõe de nenhuma informação, é comum adotar-se o valor de 200 L/hab.dia. As concessionárias dos serviços de água podem, no entanto, estabelecer outros valores em função dos tamanhos dos lotes, previsão da renda econômica dos usuários, entre outros parâmetros.

Na cidade de São Carlos (SP), embora o consumo médio *per capita* de água seja da ordem de 173 L/hab.dia, é comum a concessionária local adotar o consumo médio de 200 L/hab.dia.

O consumo médio *per capita* está relacionado ao nível de consumo de uma determinada comunidade e está relacionada à renda média, existência de pavimentação, nível cultural, etc.

- **Vazão Média de consumo de água ($\bar{Q}$):**

Refere-se ao volume médio diário consumido por uma determinada população. No entanto, a vazão é normalmente representada em volume consumido por segundo, conforme **Equação 08:**

$$\bar{Q} = \frac{P \cdot q}{86400} \quad (08)$$

Onde: P é a população atendida (n° habitantes); q é o consumo médio *per capita* (l/hab.dia); $1/86400$ é o fator de conversão de dia para segundos; $\bar{Q}$ é a vazão média consumida de água (l/s).

- **Padrão de Consumo de água (φ):**

Refere-se à variação do consumo médio de água (q) e estão relacionados a fatores climáticos como temperatura, umidade relativa do ar (consumimos mais água no verão se comparado com o consumo no inverno), fatores horários (consumimos mais água nos períodos matutino e vespertino se comparado aos volumes consumidos no período noturno), sazonais (atividades que ocorrem sazonalmente).

O conhecimento do padrão de consumo de uma comunidade, ou de um determinado setor de abastecimento, tornam mais realista as simulações operacionais dos SAA.

Em relação ao dimensionamento das unidades do SAA, os maiores interesses se voltam para os coeficientes do dia (K_1) e da hora (K_2) de maior consumo.

Para o dimensionamento das redes de distribuição, os projetistas consideram que a rede deve operar em condições pré-estabelecidas para o dia e na hora em que ocorrerem os maiores consumos, daí a adoção dos fatores K_1 e K_2 simultaneamente. Contudo, para o dimensionamento das captações de água e para os reservatórios públicos de abastecimento, considera-se o fator K_1 , o qual está relacionado ao dia de maior consumo.

Na análise de dados empregados na busca de vazamentos, o coeficiente do dia de menor consumo (K_3) é bastante empregado.

- **Vazões de projeto:**

Referem-se às vazões máxima (diária e horária), máxima diária, média e mínima.

Média: $\bar{Q} = \frac{P \cdot q}{86400}$

Máxima *Maximorum*: $Q_{máxima} = K_1 \cdot K_2 \cdot \bar{Q}$

Máxima diária: $Q_{max.diário} = K_1 \cdot \bar{Q}$

Mínima *Minimorum*: $Q_{mínima} = K_3 \cdot \bar{Q}$

Os valores de K_1 , K_2 e K_3 devem ser muito bem estabelecidos e, normalmente, são fornecidos pela concessionária quando da elaboração do projeto.

Quando não se tem informações a respeito, costuma-se adotar os seguintes valores: $K_1 = 1,25$; $K_2 = 1,50$; $K_3 = 0,50$. A NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017) sugere que, na inexistência de histórico, sejam adotados os valores $K_1 = 1,2$; $K_2 = 1,5$; $K_3 = 0,5$.

Dessa maneira tem-se: $Q_{m\acute{a}xima} > Q_{max.di\acute{a}rio} > \bar{Q} > Q_{m\acute{i}nima}$.

- **Vazões Características:**

Refere-se à vazão de projeto dividida pelo comprimento total da rede de distribuição ou em relação a área total abastecida.

$$q_L = \frac{\bar{Q}}{\sum L}$$

$$q_A = \frac{\bar{Q}}{A}$$

Sendo: $\bar{Q}$ a vazão média (L/s); $\sum L$ o comprimento total da rede de distribuição que realmente contribui com a distribuição de vazão (m); A é a área total abastecida (m²); q_L é a vazão característica em relação ao comprimento (l/s.m²); q_A é a vazão característica em relação a área abastecida (l/s.m²).

- **Pressões de serviço:**

Referem-se às pressões máxima (estática) e mínima (dinâmica) observadas no SAA na ocorrência de regime hidráulico permanente.

Nas redes de distribuição de água, a norma NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017) estabelece que a pressão mínima (dinâmica) – aquela que ocorre quando a rede está alimentando todos os consumidores na condição mais extrema – é de **10mH₂O** (100 kPa); enquanto a pressão máxima (estática) – aquele que ocorre quando não há nenhum consumo de água – é de **40 mH₂O** (400 kPa).

No entanto, a mesma NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017) menciona que sempre que possível, deve-se adotar as pressões estáticas entre 25 e 30 mH₂O (250 e 300 kPa).

Já nas adutoras e linhas de recalque, deve-se observar a pressão máxima de serviço, estabelecida em função da Classe de Pressão de cada material.

- **Perda de carga unitária máxima (J_{max}):**

Trata-se da perda de carga observada dividido pelo comprimento do trecho. É comum empregar a perda de carga unitária máxima como parâmetro para seleção do diâmetro da tubulação.

No caso das redes de distribuição de água, a NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017) estabelece que as velocidades máximas de escoamento devem resultar em perdas de carga unitárias máximas de 10m/km (0,010m/m). Vale mencionar que algumas concessionárias de água empregam $J_{max} = 8m/km$ (0,008m/m).

A **Tabela 17** apresenta as vazões e velocidades máximas para tubulações de PVC, calculadas a partir dos diâmetros internos das tubulações e considerando $J_{\max} = 8\text{m/km}$.

Tabela 17: Vazões e velocidades máximas permitidas para tubos de PVC, considerando $J=8\text{m/km}$.

Diâmetro Nominal DN	Diâmetro Interno – Di (mm)	Vazão Máxima suportada – $Q_{\max}$ (L/s)	Velocidade Máxima permitida – $V_{\max}$ (m/s)
50	51,8	1,0	0,5
75	73,4	2,5	0,6
100	95	5,0	0,7
150	149	16,4	0,9
200	194	32,8	1,1
250	240	57,4	1,3
300	285	90,2	1,4

Nota: Perda de Carga por Hazen-Wiliams com $C=120$. Tubos de PVC.

Fonte: O autor

5.4.2 Dimensionando a rede de distribuição

O EPANET não possui uma rotina de cálculo específica para dimensionar sistemas hidráulicos. O software limita-se a realização da análise hidráulica do modelo construído. Dessa maneira, é necessário desenvolver uma rotina que permita distribuir as vazões de consumo e determinar os diâmetros dos trechos de tubulação.

5.4.2.1 Cálculo da Vazão Característica Linear e Carregamento dos Nós

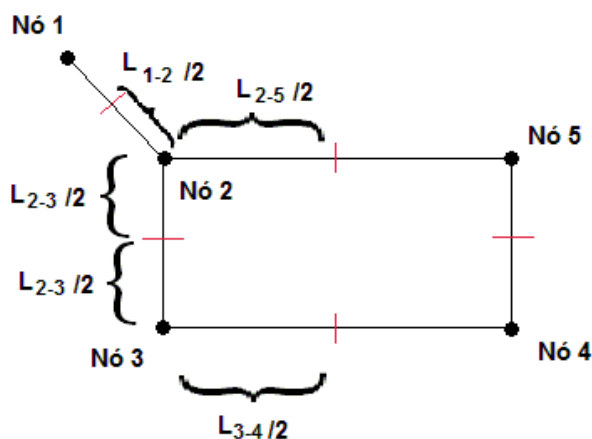
Em uma rede de distribuição de água, a vazão consumida é distribuída aos consumidores ao longo do comprimento do trecho, através das ligações prediais.

No EPANET, as vazões consumidas por uma determinada região são concentradas nos nós. Assim, faz-se necessário converter uma vazão característica (l/s.m ou l/s.m^2) em vazão concentrada.

Uma das maneiras utilizadas na determinação das vazões concentradas é estimar as influências que os trechos de tubulações exercem sobre cada nó em termos de vazão.

Admita uma rede malhada com quatro nós e cinco trechos, conforme apresentada na **Figura 115**.

Figura 115: Determinação das vazões nos Nós a partir dos comprimentos influentes daquele Nó.



Fonte: o autor

Observe o Nó 2 mostrado na **Figura 115**. A vazão nesse nó é influenciada pela vazão distribuída ao longo da metade dos trechos 2-5, 2-3 e 1-2. Já a vazão concentrada no Nó 3 é influenciada pela vazão distribuída em metade dos trechos 2-3 e 3-4, e assim sucessivamente com os demais nós.

Assim, a vazão em um nó pode ser estimada como apresentado na **Equação 09**:

$$Q_{Nó\ i} = \frac{q_L}{\sum L_{influyente\ no\ Nó\ i}} \quad (09)$$

Onde; Q_i é a vazão consumida no Nó i - **Base Demand** (L/s); q_L é a vazão característica em relação ao comprimento total dos trechos contribuintes (L/s.m); $\sum L$ é a somatória dos comprimentos dos trechos que influenciam a vazão no Nó i (m).

Um roteiro para a estimativa das vazões nos Nós e que pode ser utilizado como referência é apresentada a seguir:

1) Determine os Comprimentos Fictícios dos trechos:

Construa uma tabela que relacione **TODOS** os trechos da rede e seus comprimentos reais assim como os comprimentos fictícios relativos a efetiva contribuição em termos de distribuição de vazão.

Como exemplo, visualize novamente a rede de distribuição de água apresentada na **Figura 115**. Admita que o trecho 1-2 não distribua água ao longo do seu comprimento. Ainda que o trecho 1-2 tenha (é óbvio!) um comprimento real, o fator de contribuição do comprimento real para o cálculo da vazão característica é nulo e, portanto, seu comprimento fictício será nulo, pois não há distribuição de água ao longo do comprimento.

Agora tome o trecho 2-5 como exemplo. Admita que haja casas em somente um dos lados do trecho (o lado de baixo, por exemplo). Ainda que o trecho 2-5 possua um comprimento real, apenas metade dele contribuirá distribuindo vazão, assim o fator de contribuição do comprimento real para o cálculo da vazão característica é 1/2.

Por fim, admita como último exemplo, que o Trecho 2-3 distribua água a consumidores instalados em ambos os lados do referido trecho. Nesse caso, o comprimento fictício é igual ao comprimento real do trecho, pois o fator de contribuição do comprimento real para a determinação da vazão característica é 1,0.

A **Tabela 18** ilustra a *Tabela* para caracterização dos trechos para composição da vazão característica linear:

Tabela 18: Caracterização dos fatores de contribuição dos trechos e determinação dos comprimentos Fictícios.

Trecho	Comprimento Real do Trecho (m)	Fator de contribuição do trecho	Comprimento Fictício (m)
1-2	100,0	0,0	0,0
2-5	200,0	0,5	100,0
2-3	100,0	1,0	100,0
3-4	200,0	0,5	100,0
5-4	100,0	1,0	100,0
⋮	⋮	⋮	⋮
Σ	L_{real}		$L_{Fictício}$

Fonte: O autor

2) Calcule a vazão característica linear:

Vale mencionar que, enquanto o comprimento real (L_{Real}) representa a extensão total da rede, o comprimento fictício ($L_{Fictício}$) representa o comprimento que realmente participa na distribuição da vazão aos consumidores sendo, portanto, utilizado para o cálculo da vazão característica linear, conforme **Equação 10**:

$$q_L = \frac{\bar{Q}}{\Sigma L_{Fictício}} \quad (10)$$

Sendo: q_L a vazão característica linear (l/s.m); $\bar{Q}$ a vazão média consumida (l/s); $\Sigma L_{Fictício}$ a somatória dos comprimentos fictícios dos trechos que formam a rede de distribuição de água (m).

3) Determine os Comprimentos Fictícios que contribuem para composição da vazão em cada Nó:

O comprimento fictício que contribui com vazão para cada nó é estimado como sendo a metade da somatória dos comprimentos fictícios dos trechos interligados ao respectivo Nó, conforme **Equação 11**:

$$Lfic_{Nó\ i} = \frac{1}{2} \cdot \sum Lfic_{interligados\ ao\ Nó\ i} \quad (11)$$

Sendo $Lfic_i$ o comprimento fictício de contribuição de vazão para o Nó i (m); $\sum L_{Fictício}$ a somatória dos comprimentos fictícios dos trechos que são interligados ao Nó i (m).

Construa uma tabela, conforme a **Tabela 19** e relacione **TODOS** os nós que formam a rede de distribuição de água, os trechos interligados a cada nó, os comprimentos fictícios de cada trecho, já determinados na **Tabela 18**, e os comprimentos fictícios que contribuem para a formação da vazão no nó i , calculado conforme a **Equação 11**:

Tabela 19: Determinação do comprimento fictício para contribuição da vazão nos Nós.

Nó	Trechos interligados ao Nó	Comprimento Fictício de cada Trecho (m)	$\sum$ dos Comprimentos Fictícios dos trechos interligados ao Nó (m)	Comprimento Fictício de contribuição para o Nó. (m)
1	1-2	0,0	0,0	0,0
2	1-2	0,0	200,0	100,0
	2-3	100,0		
3	2-5	100,0	200,0	100,0
	2-3	100,0		
4	3-4	100,0	200,0	100,0
	5-4	100,0		
5	3-4	100,0	200,0	100,0
	5-4	100,0		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

$\sum Lfic_i$

Fonte: O autor

4) Calcule as vazões de contribuição (**Base Demand**) para cada nó:

Conhecido o comprimento fictício de contribuição para cada Nó, calcule a vazão de carregamento (**Base Demand**) de cada nó, conforme **Equação 12**:

$$Q_i = q_L \cdot Lfic_i \quad (12)$$

Sendo: Q_i a vazão no nó i (Base Demand), q_L a vazão característica linear (l/s.m); $Lfic_i$ o comprimento fictício de contribuição para o nó i .

Para facilitar a visualização e a inserção das vazões nos Nós, construa uma tabela, semelhante à

Tabela 20 indicando o número do nó, o comprimento fictício contribuinte para este nó e a vazão calculada (**Base Demand**).

Tabela 20: Estabelecimento das vazões nos nós.

Nó	Comprimento Fictício de contribuição para o Nó. (m)	Vazão no Nó (L/s)
1	0,0	$= q_L \cdot Lfic_1$
2	100,0	$= q_L \cdot Lfic_2$
3	100,0	$= q_L \cdot Lfic_3$
4	100,0	$= q_L \cdot Lfic_4$
5	100,0	$= q_L \cdot Lfic_5$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n	$Lfic_n$	$= q_L \cdot Lfic_n$

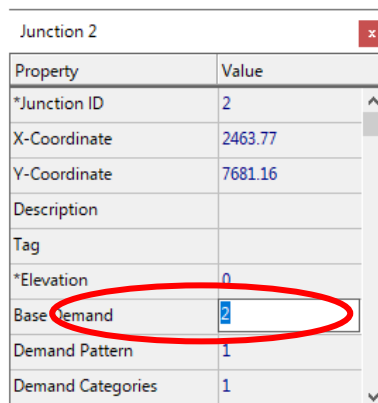
Fonte: O autor

É importante salientar que uma eventual vazão concentrada que seja uma característica específica do nó, por exemplo, um grande consumidor, deverá ser somado àquela vazão do nó i informada na

Tabela 20.

Após o cálculo das vazões para cada Nó, deve-se inserir os valores em cada Nó no campo **Base Demand**, seja editando os nós, conforme apresentado na **Figura 116**, ou alterando o arquivo .INP, conforme apresentado na seção 5.3.4.

Figura 116: Inserindo a vazão média (**Base Demand**) em cada nó.



Property	Value
*Junction ID	2
X-Coordinate	2463.77
Y-Coordinate	7681.16
Description	
Tag	
*Elevation	0
Base Demand	2
Demand Pattern	1
Demand Categories	1

Fonte: O autor

5) Estabeleça o Padrão de Consumo Máximo para o dimensionamento da rede:

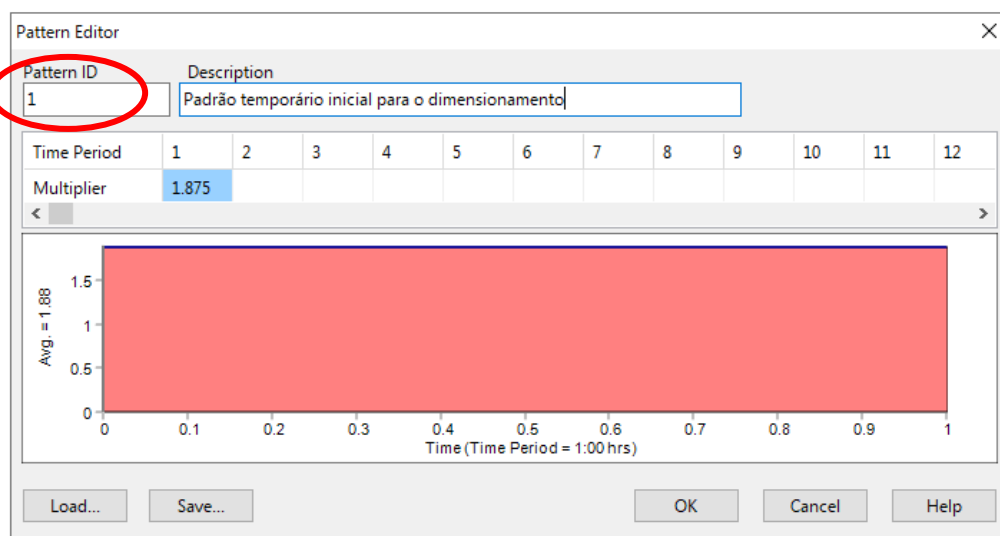
O dimensionamento das redes de distribuição deve ser feito considerando-se a vazão máxima *maximorum*, ou seja, aplicando os coeficientes de majoração do dia (K_1) e hora (K_2) de maior consumo.

O leitor deve ter percebido que as vazões nos nós consideradas (**Base Demand**) estão relacionadas à vazão média do sistema.

Assim, faz-se necessário, neste primeiro momento, criar um padrão de consumo que contenha o valor numérico referente a $K_1 \cdot K_2$. Por exemplo, caso $K_1 = 1,25$ e $K_2 = 1,50$, o fator multiplicativo referente ao padrão de consumo de água (φ) será 1,875.

Para criar o padrão de consumo, reveja a sessão **2.2.2.2**; porém, como este padrão é provisório, pode-se especificar o fator (φ) apenas para o primeiro intervalo de tempo, conforme mostrado na **Figura 117**:

Figura 117: Padrão provisório inicial para o dimensionamento da rede de distribuição de água.



Fonte: o autor

Vale reforçar que o padrão de consumo apresentado na **Figura 117** é provisório e será usado apenas para determinar os diâmetros dos trechos.

Após a criação do padrão provisório de consumo, deve-se associá-lo a cada nó, informando a identificação (ID) do padrão no campo *Padrão de Demanda (Pattern Demand)*, conforme apresentado na **Figura 118**.

Figura 118: Associação do padrão de consumo provisório para o dimensionamento da rede de distribuição de água.

Junction 2	
Property	Value
*Junction ID	2
X-Coordinate	2463.77
Y-Coordinate	7681.16
Description	
Tag	
*Elevation	0
Base Demand	2
Demand Pattern	1
Demand Categories	1

Fonte: O autor

5.4.2.2 Procedimentos para determinação dos diâmetros dos trechos

Neste momento que antecede a realização dos primeiros cálculos, seu projeto deve estar com os nós estabelecidos, as cotas de elevação determinadas, o carregamento das vazões e dos padrões estabelecidos. Os trechos devem estar com as rugosidades definidas e o diâmetro mínimo estabelecido em 51.8mm, que representa o diâmetro interno da tubulação de PVC com DN50.

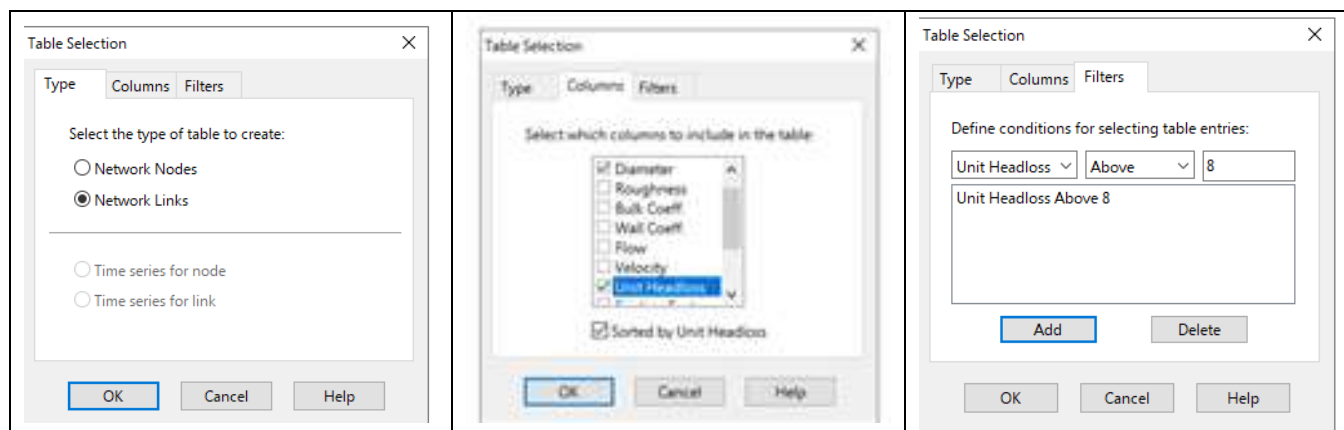
A exigência de se fixar inicialmente o diâmetro mínimo para cada trecho de tubulação está embasada nos artigos 5.6.2 e 3.30 da NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017).

Da mesma maneira, a NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017) estabelece que a perda de carga unitária máxima ($J_{\max}$) seja 10 mH₂O/km (=0,010 m/m). É comum encontrar concessionárias de água estabelecendo a perda de carga unitária máxima ($J_{\max}$) como sendo 8m/km (= 0,008 m/m).

Assim, estabelecido o traçado da rede, estabelecendo o diâmetro inicial para as tubulações como sendo **DN50** e lançadas as cotas de elevação, as vazões médias (**Base Demand**) e o padrão máximo *maximorum* para o consumo nos nós, roda (**Run**) o modelo.

Na sequência, visualiza-se, avalia-se os valores das perdas de carga unitárias de cada trecho, o que pode ser feito a partir da barra de Menu em **Report >>> Tables... >>>** na aba **Type**, selecionando **Network Links**, depois, na aba **Columns** selecionando **Diameter (Diâmetro)** e **Unit Headloss (Perda de Carga Unitária)** e, por fim, na aba **Filters**, selecionando Unit Headloss acima (above) 8 m/km, conforme indicado na **Figura 119**:

Figura 119: Configurando a Tabela de resultados para apresentar a perda de carga unitária (J) dos trechos com $J > 8\text{m/km}$.

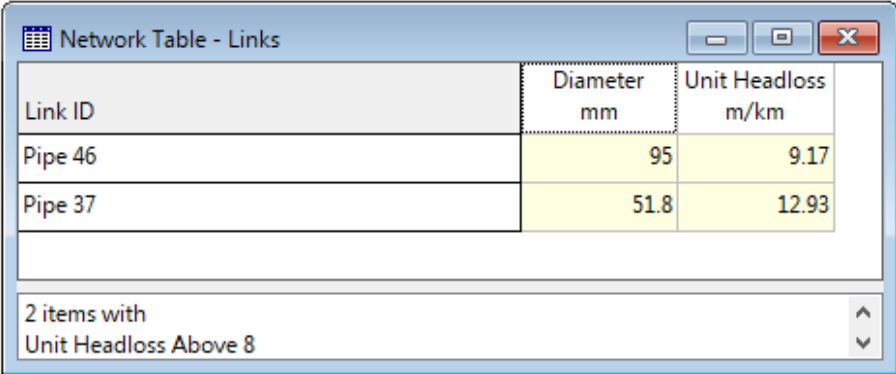


Fonte: O autor

Na sequência, é apresentada a Tabela com a identificação dos trechos, dos diâmetros adotados e das perdas de carga unitária (J) que resultaram em valor superior a 8m/km, conforme a .

Figura 120.

Figura 120: Tabela com os resultados dos trechos com $J > 8\text{m/km}$.



Link ID	Diameter mm	Unit Headloss m/km
Pipe 46	95	9.17
Pipe 37	51.8	12.93

2 items with
Unit Headloss Above 8

Fonte: O autor

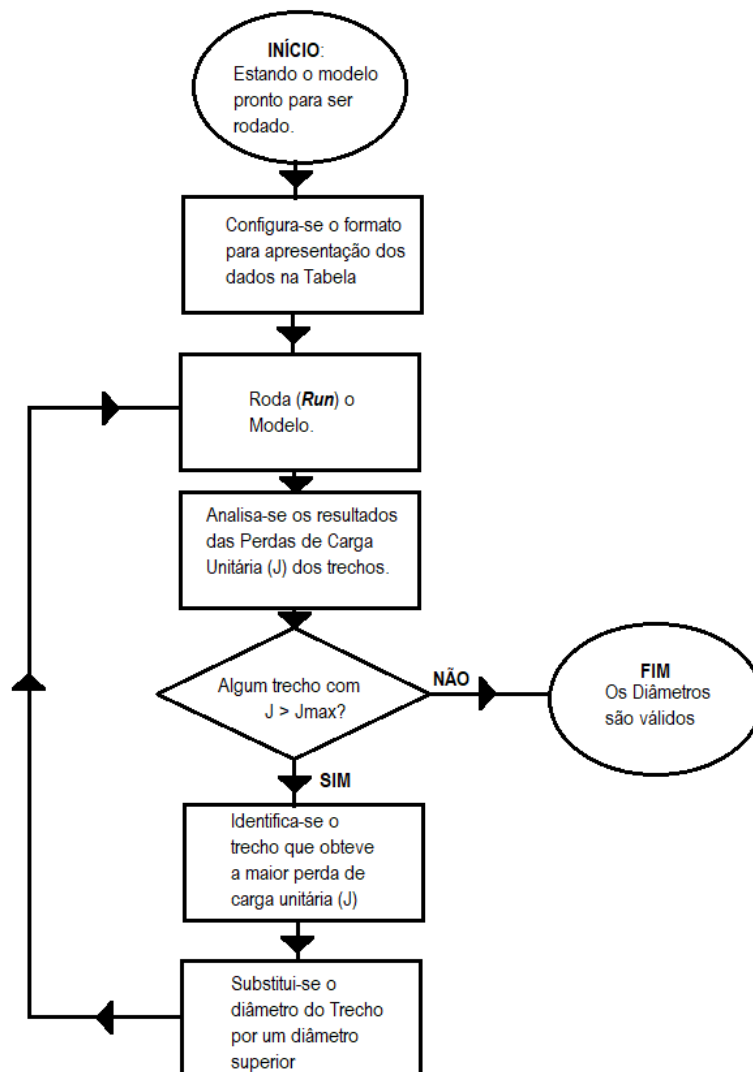
Após observar os resultados contidos na tabela apresentada na .

Figura 120, toma-se o trecho com a maior perda de carga unitária (J) que, no exemplo é a tubulação ID=27 ($J=12,93$ m/km e $D_i=51,8$ mm (DN50)) e substitui-se o diâmetro desse trecho por um diâmetro acima, no caso $D_i=73,4$ mm (DN75).

Após a substituição do diâmetro no referido trecho de tubulação, roda-se (**Run**) novamente o modelo, avaliam-se os resultados, até que todos os trechos resultem em perda de carga unitária inferior a 8m/km, ou a perda de carga unitária máxima (J_{max}) estabelecido.

O fluxograma apresentado na **Figura 121** ilustra os procedimentos que o usuário deve ter ao realizar o dimensionamento da rede de água no EPANET.

Figura 121: Fluxograma do processo mental para o pré-dimensionamento dos trechos.



Fonte: O autor

Uma vez encontrados os diâmetros das tubulações, faz-se necessário verificar as pressões dinâmicas (mínimas) e estáticas (máxima) para cada nó.

Para tanto, faz-se necessário estabelecer as cotas de fundo e do nível máximo do reservatório, e que estão intimamente relacionadas com o volume de reservação.

A norma NBR 12.218:2017 (ABNT) estabelece que a pressão dinâmica (mínima) é de 10 mH₂O (100 kPa), e a pressão estática (máxima) é de 40 mH₂O (400 kPa), podendo chegar a 50 mH₂O (500 kPa) em regiões de topografia acidentada, e todas elas tendo como referência o nível do terreno.

5.4.3 Dimensionando o Volume de Reservação e Estabelecendo as Cotas Características do Reservatório.

Uma das funções dos reservatórios é manter as pressões na rede dentro de valores estabelecidos.

A norma NBR 12.218:2017 (ABNT) estabelece que a pressão dinâmica (mínima) é de 10 mH₂O (100 kPa), e a pressão estática (máxima) é de 40 mH₂O (400 kPa), podendo chegar a 50 mH₂O (500 kPa) em regiões de topografia acidentada, e todas elas tendo como referência o nível do terreno.

No início do traçado da rede de distribuição de água, fixamos o reservatório em uma determinada cota de elevação. No caso de um reservatório de nível variável – RNV (**Tank**), é necessário estabelecer o nível mínimo (**Minimum Level**), equivalente a altura do fundo do reservatório em relação à cota de elevação do terreno onde está assentado, o nível máximo (**Maximum Level**) e o nível inicial (**Initial Level**), referente ao nível de água no reservatório no início de uma simulação ao longo do tempo.

De início é importante estabelecer que o nível inicial (**Initial Level**) deve ser, ao menos, ligeiramente superior ao nível mínimo (**Minimum Level**).

A **Figura 122** ilustra um exemplo de dados para o RNC adotado para o abastecimento de um SAA:

Figura 122: Exemplo de configuração inicial do RNV.



Property	Value
V-Coordinate	9570.00
Description	
Tag	
*Elevation	875.20
*Initial Level	5.01
*Minimum Level	5
*Maximum Level	20
*Diameter	50
Minimum Volume	

Fonte: O autor

Estabelecidas as condições iniciais e provisórias do RNV, roda-se (**Run**) o modelo, buscando, logo em seguida, pela menor pressão obtida.

Considere que o processo de busca pela menor pressão tenha resultado o valor de 4,73 mH₂O.

Como a pressão mínima (dinâmica) estabelecida foi de 10,00 mH₂O, é necessário elevar a cota de fundo do reservatório (**Minimum Level**) em, pelo menos, $(10,00 - 4,73) = 5,27$ m.

Como a cota inicial (provisória!) foi estabelecida em 5,0 m, para que se obtenha pressão mínima na rede, o nível mínimo do reservatório deve estar em $(5,00 + 5,27) = 10,27$ m acima da

cota de assentamento do reservatório. Dessa maneira, ao rodar-se (Run) novamente o modelo a pressão mínima (dinâmica) obtida será de 10,00 mH₂O.

Uma vez estabelecida a cota do nível mínimo (**Minimum Level**), faz-se necessário estabelecer a cota do nível máximo (**Maximum Level**), a fim de se determina a pressão máxima (estática) na rede.

No entanto, a determinação do nível máximo de água depende do conhecimento do nível de reservação desejado.

Uma fórmula prática entre os engenheiros sanitaristas para estabelecer o volume de reservação mínimo necessário ao abastecimento é considerar 1/3 do volume de água consumido no dia de maior consumo, conforme **Equação (13)**:

$$V_{min} = \frac{1}{3} \cdot \frac{P \cdot K_1 \cdot q}{1000} \quad (13)$$

Sendo: V_{min} o volume mínimo de reservação necessário ao abastecimento (m³), P é a população atendida (habitantes); K_1 é o coeficiente do dia de maior consumo (adimensional); q é o consumo médio percapita (L/hab.dia).

Assim, por exemplo, assumindo $P = 1300$ habitantes; $q = 200$ L/hab.dia; $K_1 = 1,25$, o volume mínimo para reservação será 108,3 m³.

Admita agora que o reservatório tenha o formado de um cilindro, cujo diâmetro interno seja de 5,00. Nesse caso, a altura de água no reservatório será de 5,52m, conforme obtido pela Equação:

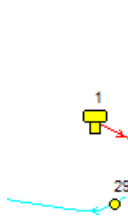
$$V = \frac{\pi \cdot D_R^2}{4} \cdot h \rightarrow h = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_R^2} = \frac{4 \cdot 108,3}{\pi \cdot 5,00^2} = 5,52m$$

Dessa maneira, o nível máximo de água no reservatório (**Maximum Level**) será a altura e água (h) acrescida da altura do nível mínimo (**Minimum Level**), ou seja: 10,27 + 5,52 = 15,79m.

A

Figura 123 ilustra a caracterização final do RNV estabelecido para o modelo.

Figura 123: Caracterização final do RNV usado como exemplo.



Property	Value
Description	
Tag	
*Elevation	875.20
*Initial Level	10.28
*Minimum Level	10.27
*Maximum Level	15.79
*Diameter	5
Minimum Volume	
Volume Curve	

Fonte: O autor

A determinação da cota do nível d'água máximo (**NA_{max}**) é obtida somando-se a cota de elevação (**$*Elevation$**) do RNV ao nível máximo (**$Maximum Level$**).

Usando como exemplo os valores apresentados na

Figura 123, tem-se que a cota do NA_{max} é $875,20 + 15,79 = 890,99m$.

Para determinar a pressão máxima (estática) basta aplicar a **Equação 14**:

$$P_{max} = NA_{max} - CT_{min} \quad (14)$$

Onde: P_{max} é a pressão máxima (estática) do SAA (mH₂O), NA_{max} é a cota do nível máximo de água do RNV (m); CT_{min} é a menor cota de elevação do terreno de um determinado nó atendido pelo RNV.

No projeto desenvolvido no EPANET, a pesquisa pela menor cota de elevação pode ser realizada empregando-se o comando Tabela (**Tables...**).

Admita, como exemplo, que a menor cota de elevação de um nó tenha sido 865,50. Assim, ao aplicar a **Equação 14** obtém-se: $P_{\max} = 890,99 - 865,50 = 25,40 \text{ mH}_2\text{O} < 40 \text{ mH}_2\text{O}$, este último estabelecido pela norma NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017).

Caso a pressão máxima observada (**$P_{\max}$**) no SAA fosse superior ao valor máximo estabelecido pela norma NBR 12.218:2017 (BNT,2017), o projetista poderia analisar a possibilidade de aumento do diâmetro do reservatório (e consequentemente diminuição do nível máximo d'água) ou a instalação de válvulas redutoras de pressão (**PRV**) ao longo da rede de distribuição.

5.4.4 Avaliação do funcionamento dos hidrantes após o dimensionamento dos trechos da rede e definição das alturas características do reservatório

A partir da caracterização do sistema de abastecimento, faz-se necessário verificar a sua funcionalidade quando um hidrante é posto em funcionamento.

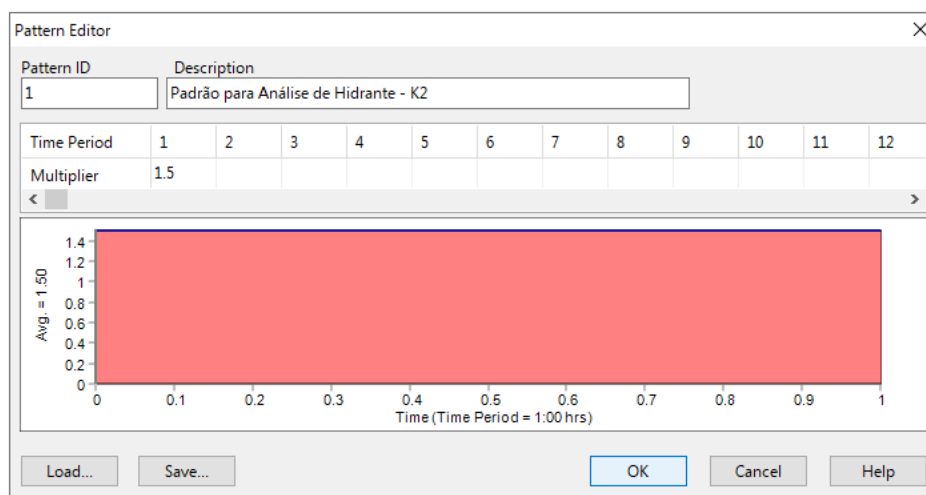
O hidrante urbano de coluna é um dispositivo para combate a incêndios, cujas características mínimas de vazão e número de instalações estão definidas na norma NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017), assim como nas Normas Internas dos Corpos de Bombeiros Estaduais.

A norma NBR 12.218:2018 (ABNT, 2017) recomenda que na avaliação da capacidade do(s) hidrante(s) seja aplicada a demanda máxima horária (K_2) na rede de distribuição.

Assim, faz-se necessário estabelecer o fator do padrão de consumo (φ) igual ao coeficiente da hora de maior consumo (K_2).

A **Figura 124** ilustra a alteração do padrão (**Pattern**) estabelecido para o dimensionamento da rede de distribuição de água:

Figura 124: Padrão da hora de maior consumo para análise do funcionamento de Hidrantes.



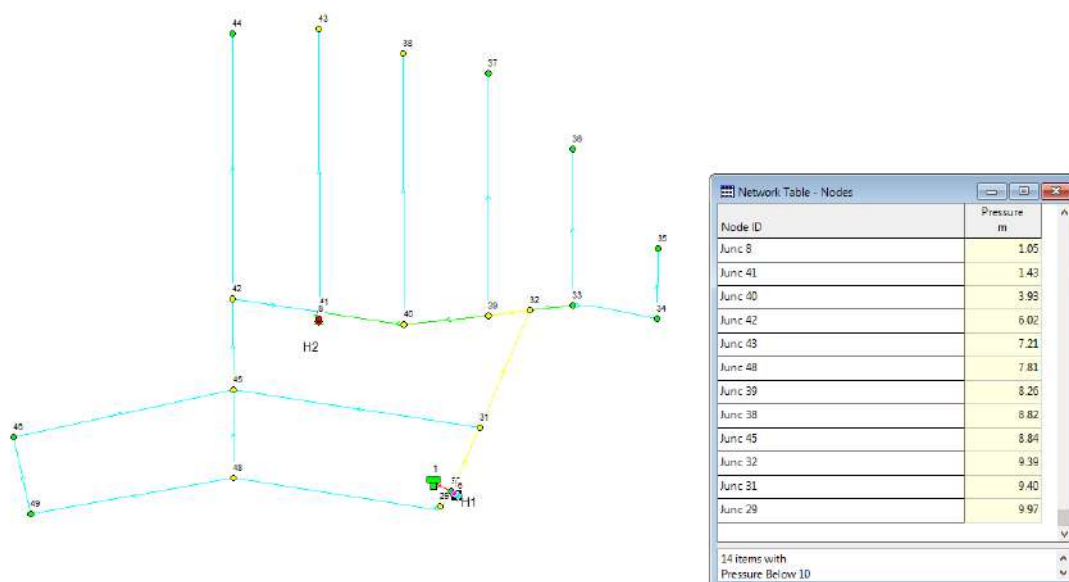
Fonte: O autor

Após a redefinição do padrão de consumo para a hora de maior demanda, rode (**Run**) o modelo e analise as pressões nos nós cujos valores ficaram abaixo da pressão mínima (dinâmica) estabelecida pela norma NBR 12.218:2017 (ABNT, 2017), fixada em 10 mH₂O.

A

Figura 125 ilustra, como exemplo, um resultado das pressões dinâmicas nos nós.

Figura 125: Resultado de simulação para abertura de um hidrante (H2).



Fonte: O autor

Salientamos que a abertura de um hidrante provoca o rebaixamento da linha piezométrica em seu entorno, fazendo com que as pressões nos nós adjacentes diminuam consideravelmente, a ponto de não haver carga de pressão suficiente para abastecer os reservatórios das residências localizadas no entorno.

Por se tratar de uma situação operacional não rotineira, é possível aceitar tal ocorrência. No entanto, **NÃO é aceitável** a verificação de nós com pressões menores ou iguais a zero após a abertura de qualquer hidrante. Caso isso ocorra, deve-se rever os diâmetros das tubulações ou mesmo a altura do reservatório, a fim de não permitir a ocorrência de tal situação.

5.4.5 Dimensionando o Sistema de Bombeamento do Poço

Qualquer que seja o reservatório de nível variável (**RNV**), ele deve possuir alguma fonte de suprimento, seja uma ETA, uma subadutora ou um poço profundo. Qualquer que seja a fonte de alimentação, ela deve garantir vazão para atendimento do dia de maior consumo (K_1).

Nesta seção será discutida a alimentação realizada por um poço profundo.

Um empreendimento imobiliário atenderá 1300 habitantes. Admitindo que o consumo médio *per capita* (q) seja de 200 L/hab/dia e o coeficiente do dia de maior consumo (K_1) de 1,25, a produção mínima de água deve ser da ordem de 3,76 L/s.

Considere que um poço foi perfurado próximo ao **RNV** e, após os testes de bombeamento, verificou-se que o nível dinâmico do lençol freático se estabilizou na cota

725,00. Além disso, o poço somente pode ser explorado por 15h/dia. Dessa maneira a vazão mínima de bombeamento é de $\frac{24}{15} \cdot P \cdot K_1 \cdot q = 6,0 \text{ L/s}$.

Tomando o exemplo apresentado na sessão **5.4.3**, a cota em que está estabelecido o nível máximo de água do RNV é 890,99m.

Foi instalada uma bomba de 6 estágios a 10,00m abaixo do dinâmico, ou seja, na cota 715,00m, o diâmetro do tubo edutor é de 3" (75mm), cujo comprimento até p reservatório é de 190m e as perdas de carga localizadas apresentam $K=6,0$.

Dessa maneira, desnível geométrico é de $890,99 - 725,00 = 165,99 \text{ m}$.

A **Figura 126** ilustra as curvas características da bomba submersa e a

Fonte: KSB (s.d.)

Tabela 21 apresenta alguns pontos característicos da curva, obtidos a partir da figura e utilizados para a construção da curva característica da bomba no EPANET.

Figura 126: Curvas Características da bomba submersa empregada no exemplo.



Bombas Submersas

UPA200-14/...

Rotores fundidos

Motobomba submersa para diâmetros de poço de 200 mm (8 polegadas) e maiores.

Notas para a seleção:

As perdas de carga na válvula de retenção não estão incluídas nas curvas.

Válvula de retenção com rosca fêmea 3" NPT.

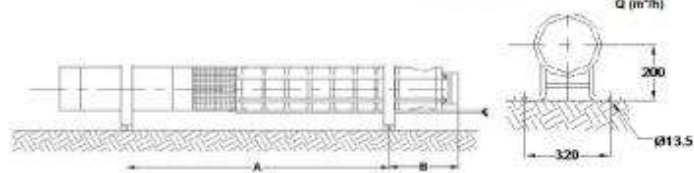
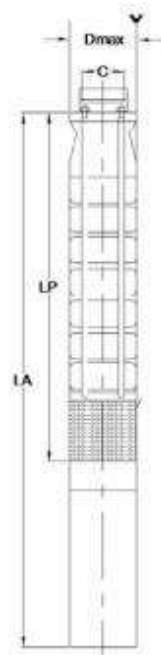
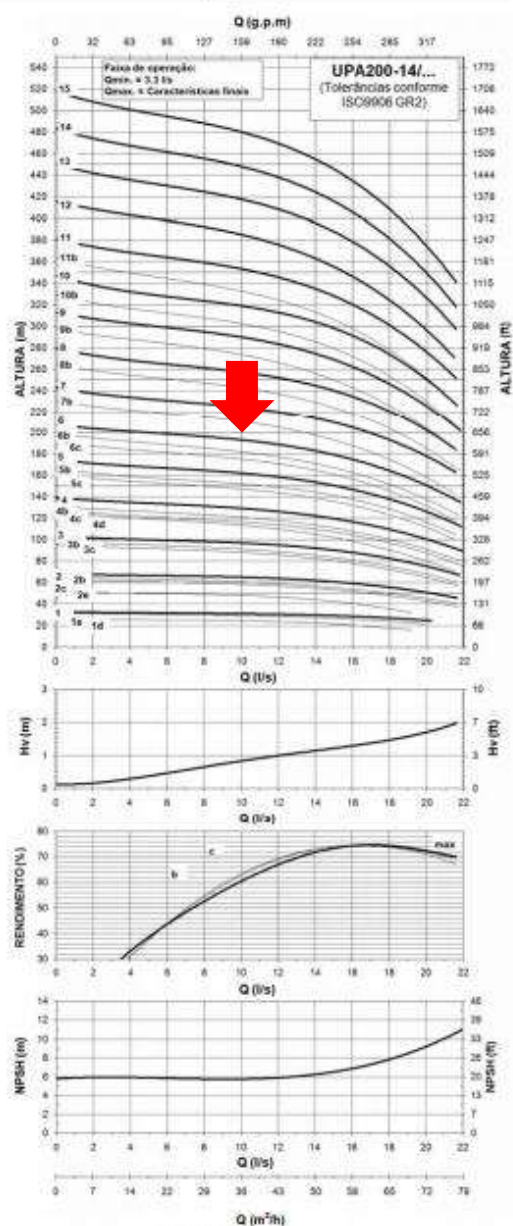


Fig. 07

Tolerâncias das curvas conforme norma ISO 9906 Grau 2



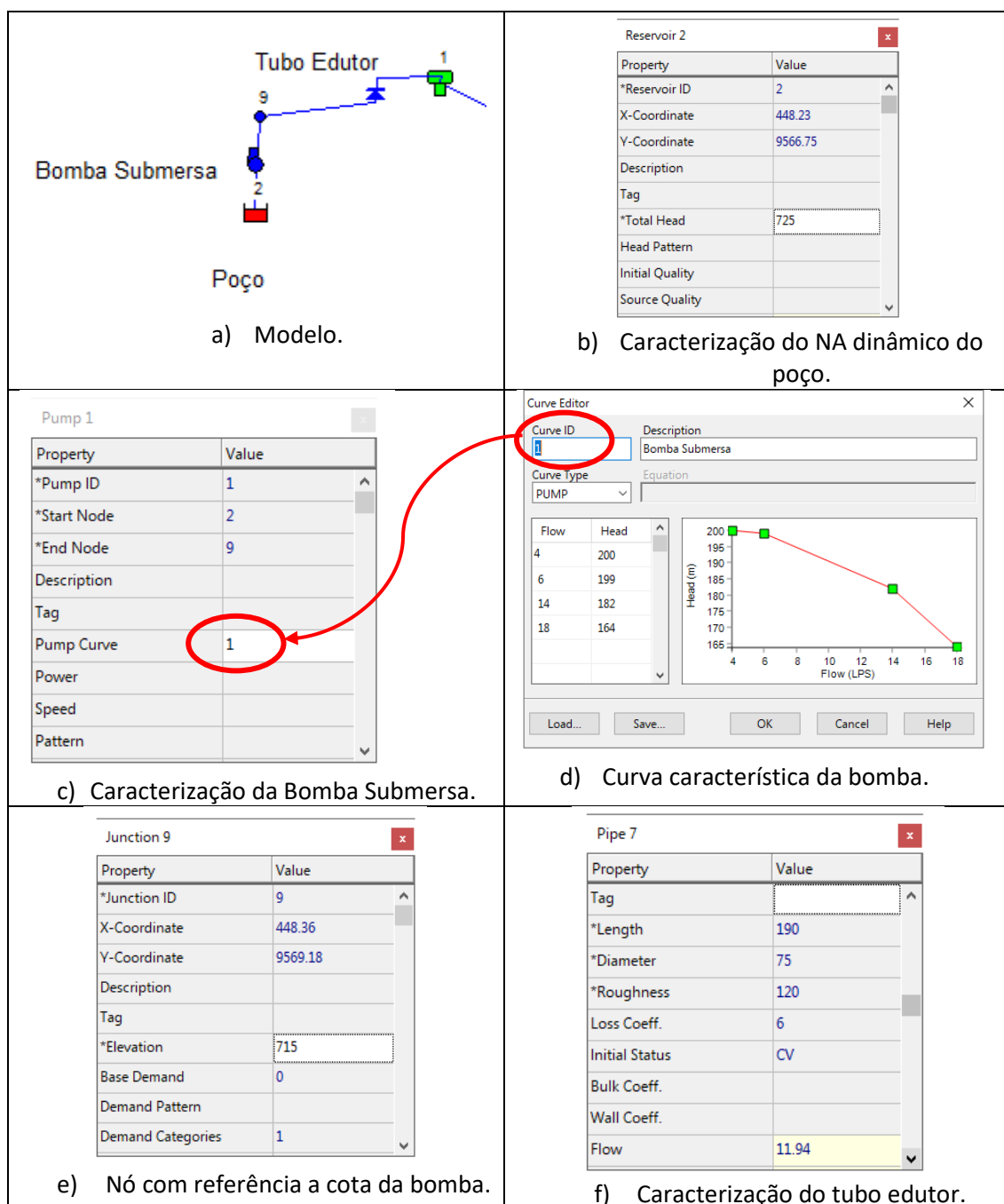
Fonte: KSB (s.d.)

Tabela 21: Pontos característicos da bomba submersa obtidos da Figura 126.

Vazão (l/s)	Altura de Elevação (m)
4	200
6	199
14	182
18	164

Fonte: O autor

A **Figura 127** ilustra a caracterização da modelagem do poço profundo como unidade de captação de água:

Figura 127: Caracterização da modelagem do poço como mecanismo de abastecimento do RNV exemplificado.

Após a modelagem do sistema de captação em manancial subterrâneo, interligado ao reservatório de nível variável (**RNV**) do loteamento, realizou-se a simulação e verificou-se que a vazão explotada pelo poço foi de 11,94 L/s, conforme pode ser visualizado na **Figura 127.f**.

6 SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A curiosidade do ser humano em prever o futuro, principalmente ao se deparar com indagações do tipo “e se?” é o que motiva a utilização de técnicas de simulação.

A simulação permite que façamos uma reflexão sobre o comportamento de um sistema modelado. Assim, quanto mais próximo da realidade o modelo for construído, mais complexo e mais assertivo será o resultado da simulação.

Dessa maneira, a simulação de um sistema permite experimentá-lo sob diferentes situações e aprender sobre ele ou sobre como ele está sendo gerenciado.

Sobre o aspecto temporal, as simulações podem ser **estáticas**, referentes àquelas simulações realizadas para um determinado tempo, em geral, para $t=0$; ou **dinâmicas**, referentes àquelas simulações realizadas para um determinado intervalo de tempo.

Os capítulos 4 e 5 abordaram, basicamente, a simulação **estática**, ou seja, para uma única situação estabelecida em $t=0$. Neste capítulo 6 será apresentada e discutida a **simulação dinâmica** de um modelo no EPANET.

Assim, para a simulação **dinâmica** de um sistema de abastecimento no EPANET, é necessário estabelecer algumas condições temporais e algumas regras operacionais, as quais serão abordadas na sequência.

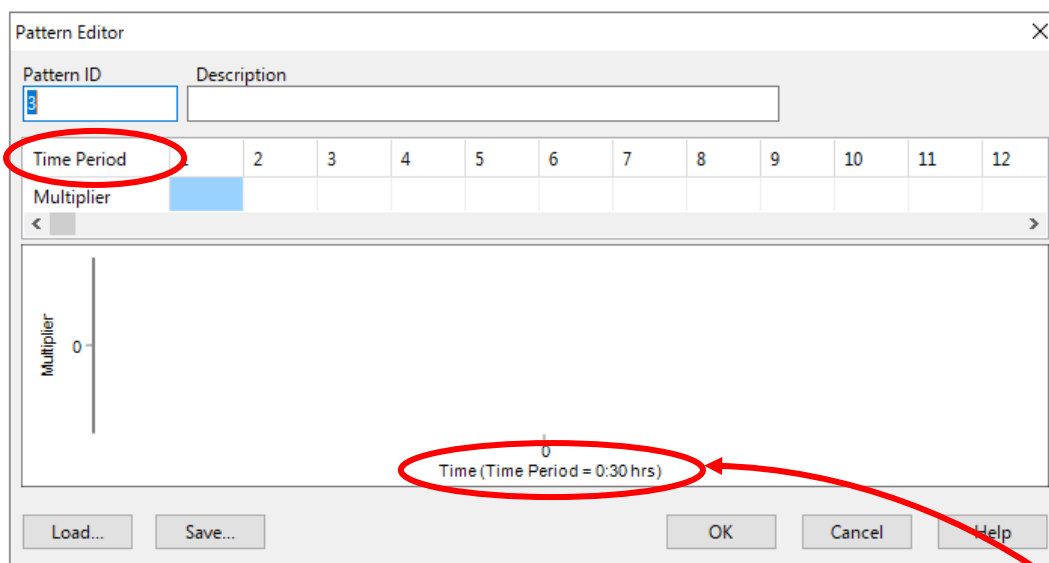
6.1 Padrões Temporais

Os padrões temporais foram apresentados, de maneira geral, na seção 2.2.2.2. Eles representam uma curva de variação temporal de um determinado parâmetro a ser modelado, seja o consumo de água (inserido em um nó), seja o custo da energia elétrica (inserido em **Price Pattern** nas características da bomba), seja a vazão da bomba (inserido em **Pattern** nas características da bomba).

A

Figura 128 ilustra o Editor do Padrão (***Pattern Editor***), com destaque para o campo *Período* (intervalo) *de Tempo* (***Time Period***) e o intervalo de tempo adotado para cada período de tempo. No caso, o tempo adotado para cada período (intervalo) de tempo é de 30 minutos (0h30.).

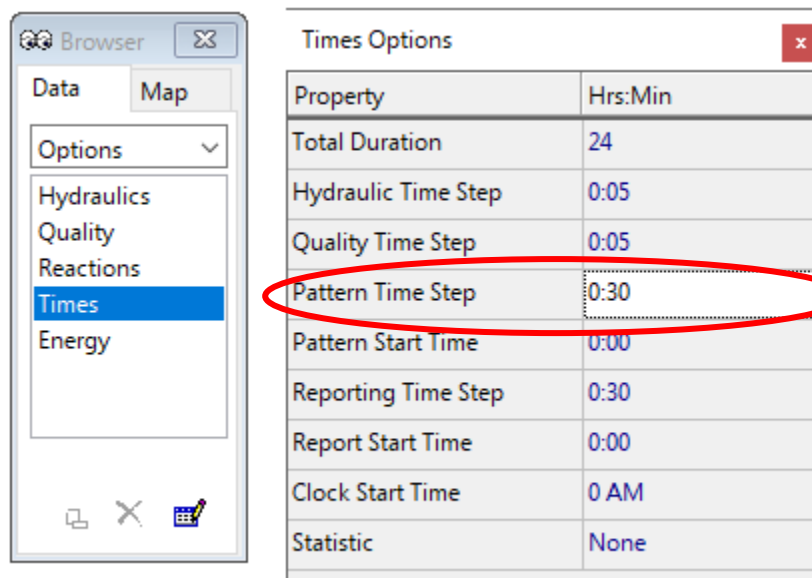
Figura 128: Particularidades do Editor de Padrão (*Pattern Editor*).



Fonte: O autor

Na informação *Período de Tempo (Time Period)* o *Editor do Padrão (Pattern Editor)* apresenta 24 períodos (intervalos) de tempo, e cada período de tempo é estabelecido a partir da opção *Tempo (Time)* no *Visualizador/Navegador (Browser)* do EPANET (*aba Data >>> Times*), conforme apresentado na **Figura 129**.

Figura 129: Configurando o intervalo de tempo do Padrão.



Fonte: O autor

Nas opções disponibilizadas de tempo, existem nove parâmetros a serem considerados:

- **Duração Total (Total Duration):**

Refere-se ao tempo de simulação a ser considerado.

- **Hora de início (Clock Start Time):**

Refere-se à hora oficial que se inicia a simulação.

- **Intervalo de tempo Padrão (Pattern Time Step):**

A determinação do intervalo de tempo do Padrão é muito importante para a própria configuração do Padrão.

Admita por exemplo, que seja adotado intervalo de tempo de 30 minutos. Isso significa que cada valor multiplicativo inserido fará referência a um período (intervalo) de tempo de 30 minutos, o que resultará em um período total de 12 horas. Com isso, em uma simulação, o padrão estabelecido se repetirá a cada 12 horas.

- **Hora de início do Padrão (Pattern Start Time):**

Refere-se à hora em que o primeiro valor do padrão será aplicado.

- **Intervalo de tempo para simulação Hidráulica (Hydraulic Time Step) e Intervalo de tempo para simulação da Qualidade (Quality Time Step):**

Referem-se, respectivamente, aos intervalos de tempo para a realização dos cálculos hidráulicos e de qualidade.

Se o intervalo de tempo para simulação (*Hydraulic Time Step*) ou (*Quality Time Step*) for maior que o estabelecido para o intervalo de tempo padrão (*Pattern Time Step*) ou aquele estabelecido para o intervalo de tempo para reportar os resultados (*Reporting Time Step*) o valor será automaticamente reduzido.

- **Intervalo de tempo para reportar resultados (Reporting Time Step):**

É o intervalo de tempo estabelecido que será empregado para reportar os resultados.

A **Figura 130** ilustra o intervalo de tempo adotado para reportar os resultados:

Figura 130: Intervalo de tempo adotado para reportar os resultados.

Time Series Table - Link 11			
Time Hours	Flow LPS	Times Options	
0:00	0.00	Property	Hrs:Min
0:05	0.00	Total Duration	24
0:10	0.00	Hydraulic Time Step	0:05
0:15	0.00	Quality Time Step	0:05
0:20	0.00	Pattern Time Step	0:30
0:25	0.00	Pattern Start Time	0:00
0:30	0.00	Reporting Time Step	0:05
0:35	0.00	Report Start Time	0:00
0:40	0.00	Clock Start Time	0 AM
0:45	0.00	Statistic	None

Fonte: O autor

- **Estatística (Statistic):**

Determina o tipo de estatística pós-processamento que deve ser feita empregando os resultados da simulação. **AVERAGE** retorna a média dos resultados obtidos da simulação, **MINIMUM** retorna apenas os valores mínimos, **MAXIMUM** retorna apenas os valores máximos obtidos da simulação, e **RANGE** retorna a diferença entre os mínimos e máximos valores obtidos. **NONE** retorna todos os valores simulados.

6.2 Escrevendo regras para simulação operacional

Os controles baseados em regras (**Rules**) permitem estabelecer relações entre o status de um link e sua configuração, baseado em um conjunto de condições que devem existir em um sistema de abastecimento após um determinado intervalo de tempo.

A estrutura de uma regra segue o seguinte formato:

RULE <id>

IF <condição 1>

AND <condição 2>

OR <condição 3>

THEN <ação 1>

AND <ação 2>

ELSE <ação 3>

PRIORITY

Nome e número da Regra. Sempre deve existir

Sempre deve existir este operador lógico

Estas condicionantes (E, OU) podem ou não serem empregadas. Dependem da complexidade da regra

Sempre deve existir. Indica a ação a ser tomada

Estas condicionantes (E, SENÃO) podem ou não serem empregadas. Dependem da complexidade da regra

Seu uso é facultativo. É utilizada quando ocorrer algum conflito entre regras e é necessário estabelecer uma prioridade, recebendo valores de 1 (maior prioridade) a 5 (menor prioridade)

A condição estabelecida por uma determinada regra segue um padrão formado por **<objeto> <id> <atributo> <relação> <valor>**.

A **Tabela 22** apresenta as possibilidades existentes para objetos, atributos e relações necessárias para compor uma condição:

Tabela 22: Formatação da <configuração> de uma regra (**RULE**).

Formatação da <condição>				
<objeto>	<id>	<atributo>	<relação>	<valor>
NODE JUNCTION RESERVOIR	<id>	DEMAND HEAD PRESURE	=	Valor especificado para atender a relação
TANK		LEVEL	<>	
LINK PIPE PUMP VALVE		FLOW STATUS (OPEN, CLOSED ou ACTIVE) SETTING (PUMP SPEED ou VALVE SETTING)	< >	
SYSTEM	Não usa <id>	DEMAND	<=	
		TIME (Tempo de simulação) CLOCKTIME (hora do dia)	>=	

Fonte: O autor

A ação necessária para atendimento de uma determinada regra segue um padrão formado por **<objeto> <id> <STATUS / SETTING> IS <valor>**.

A **Tabela 23** apresenta as possibilidades existentes para compor as ações a serem tomadas em função de uma condição pré-estabelecida:

Tabela 23: Formatação da <ação> de uma regra (**RULE**).

Formatação da <ação>				
<objeto>	<id>	<STATUS / SETTING>	IS	<valor>
LINK PIPE PUMP VALVE	<id>	STATUS SETTING	IS	OPEN CLOSED

Fonte: o autor

São possíveis regras:

RULE 1
IF TANK 5 LEVEL >= 10
THEN PUMP 11 STATUS IS CLOSED

RULE 2
IF NODE 23 PRESSURE > 50
THEN VALVE 34 STATUS IS OPEN

RULE 3
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 5:00 PM
AND SYSTEM CLOCKTIME <= 8:00 PM
THEN PUMP 32 STATUS IS OPEN

6.3 Simulação Hidráulica

O módulo de simulação hidráulica do EPANET calcula a carga hidráulica nos nós e a vazão nos trechos, as alturas d'águas nos reservatórios de nível variável (**RNV**) e os consumos de um conjunto de nós ao longo do tempo.

Em cada intervalo de cálculo, os níveis de água nos reservatórios de nível constante (**RNC**) e os consumos nos nós são atualizados, de acordo com o padrão temporal que lhes está associado, enquanto que a altura de água nos reservatórios de nível variável é atualizada em função do balanço das vazões que entram e saem.

A solução para o valor da carga hidráulica e para a vazão em um determinado nó e em um determinado instante é obtida resolvendo, simultaneamente, a equação da continuidade (conservação da massa), para cada nó, e a equação da conservação da energia, para cada trecho da rede. Este procedimento de cálculo, conhecido por “Balanço Hidráulico” da rede, requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas.

O EPANET emprega o “*Método do Gradiente*” para atingir este objetivo, sendo que o leitor poderá obter maiores detalhes desse método consultando o manual do usuário do EPANET (EPA, 2000).

A duração total da simulação (**Total Duration**), assim como o intervalo de tempo hidráulico (**Hydraulic Time Step**) utilizado em uma simulação dinâmica pode ser estabelecido pelo usuário, conforme apresentado na seção 6.1.

O EPANET adota, como valor pré-definido, adota 1 hora. Intervalos de tempos inferiores ao usual serão automaticamente empregados sempre que ocorrer um dos seguintes eventos:

- O intervalo de tempo para reportar os resultados for menor que o adotado para **Hydraulic Time Step**;
- O próximo intervalo de tempo adotado para o padrão (**Pattern**) for menor que o adotado para **Hydraulic Time Step**;
- O reservatório de nível variável – RNV (**Tank**) ficar vazio ou cheio;
- Um controle simples ou controle-baseado em regras estiver ativo.

6.4 Simulação do Consumo de Energia

Pode-se considerar a simulação do consumo de energia de um sistema de abastecimento como uma particularidade da simulação hidráulica de um modelo no EPANET.

A energia consumida por um conjunto elevatório é estabelecida pela **Equação 15**:

$$E = Pot \cdot \theta = \left(\frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta} \right) \cdot \theta \quad (15)$$

Onde: E é a energia elétrica consumida (W.s); Pot é a potência instalada do conjunto motor-bomba (W); θ é o tempo de funcionamento do conjunto elevatório (s); γ é o peso específico da água, assumido como 1000 kg/m^3 ; Q é a vazão bombeada (m^3/s); H_{man} é a altura manométrica (m).

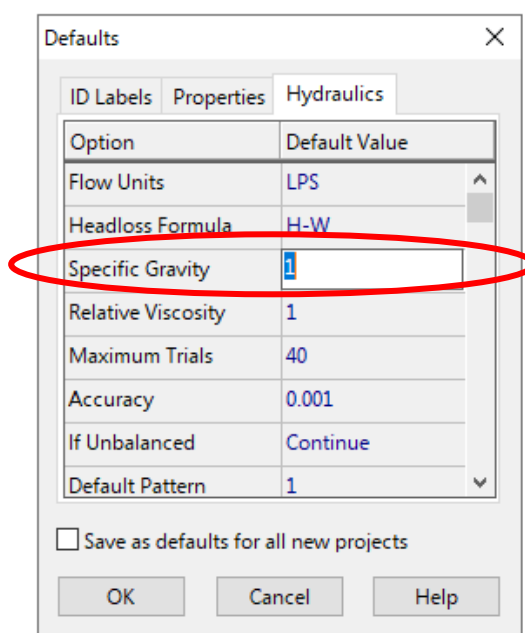
É importante notar que o EPANET considera a *gravidade específica* e não diretamente o peso específico (γ), conforme **Equação 16**:

$$s = \frac{\gamma}{\gamma_{4^{\circ}\text{C}}} = \frac{\gamma}{1000} \quad (16)$$

Onde: s é a gravidade específica (adimensional); γ é o peso específico da água a uma dada temperatura (kg/m^3); $\gamma_{4^{\circ}\text{C}}$ é o peso específico da água para a temperatura de 4°C ($=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$).

A gravidade específica pode ser alterada nas propriedades contidas em Default, conforme apresentado na **Figura 131**:

Figura 131: Verificando o valor da **gravidade específica** nas propriedades **Default** do EPANET.



Fonte: O autor

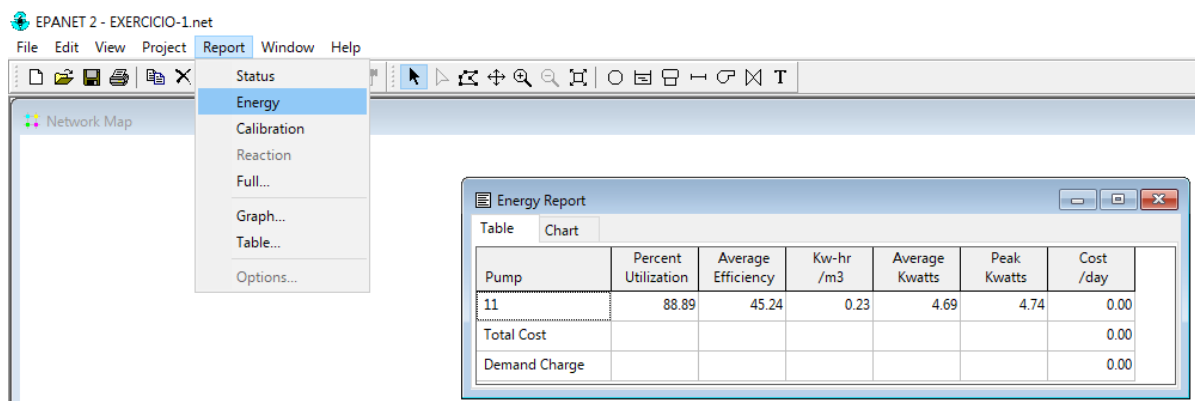
No modelo a ser simulado, a eficiência global (η) pode ser considerada a partir da curva de eficiência da bomba (**Curve >>> Efficiency**), conforme apresentado na seção **2.2.2.1**, desde que esteja considerando a eficiência global e não apenas a eficiência da bomba.

A vazão bombeada (Q) e a altura manométrica (H_{man}) são determinados pelo EPANET a partir das características do sistema de recalque, entre elas, a curva característica da bomba, também apresentada na seção **2.2.2.1**.

A determinação do tempo de funcionamento (θ) do conjunto motor-bomba depende do tempo considerado para a simulação (**Total Duration**) e dos controles baseados em regras que foram estabelecidos.

Dessa maneira é possível obter um relatório do consumo de energia, acessando a barra de menu **Report >>> Energy**, conforme apresentado na **Figura 132**.

Figura 132: Relatório do consumo de energia de uma estação de bombeamento.



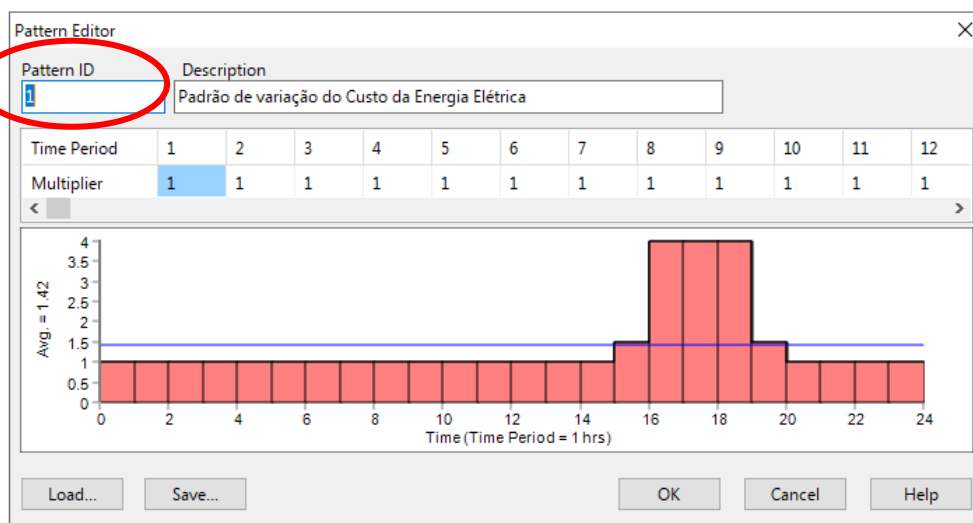
Fonte: O autor

O relatório do consumo de energia apresentado na **Figura 132**, permite visualizar, para cada bomba do modelo, a porcentagem de tempo em operação em relação ao tempo de simulação, a eficiência média, o indicador KW.h/m³, a potência média, o pico de potência, assim como o custo diário gasto com o bombeamento.

Para a determinação do custo diário de bombeamento, é necessário fornecer o padrão temporal da variação do preço da energia. Para isso é necessário criar um padrão e associá-lo a bomba.

A **Figura 133** ilustra um padrão temporal de variação do preço da energia, enquanto a **Figura 134** ilustra a associação desse padrão à bomba.

Figura 133: Padrão temporal da variação do preço da energia elétrica.



Fonte: O autor

Figura 134: Associação do padrão de preço da energia elétrica à bomba.

Pump 11	
Property	Value
Tag	
Pump Curve	1
Power	
Speed	1
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	2
Energy Price	0.80
Price Pattern	1

Fonte: O autor

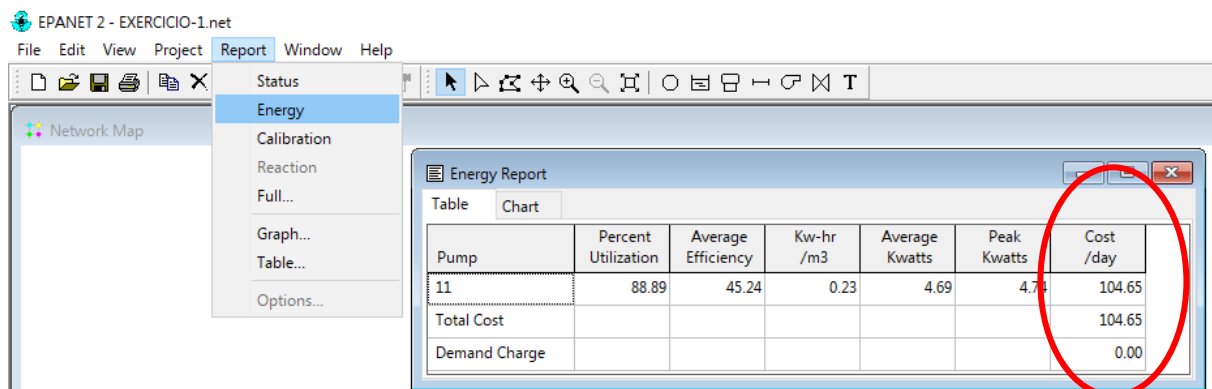
Além da consideração do padrão temporal da variação do preço da energia, é necessário estabelecer o preço da energia. O EPANET considera o custo por KW.h.

Dessa maneira, com a associação de um padrão de variação de preço da energia elétrica e do estabelecimento do preço por KW.h, o relatório de Energia também apresenta o custo diário para o bombeamento.

A

Figura 135 ilustra o relatório de consumo de energia elétrica, complementado com o custo diário da energia elétrica consumida por cada bomba existente no modelo.

Figura 135: Relatório do consumo de energia elétrica e do custo diário da energia elétrica consumida.



Fonte: O autor

6.5 Simulação da Qualidade da Água

Uma rede completamente caracterizada e uma modelagem hidráulica confiável constituem pré-requisitos essenciais para a correta modelagem de qualidade da água. O EPANET possui várias opções para a simulação da qualidade da água ao longo do tempo, no entanto, aqui foram abordados três dessas opções.

6.5.1 Determinação das Concentrações de Cloro

Toda água potável deve conter algum tipo de desinfetante residual. O mais comum utilizado é o cloro.

O Anexo XX⁵ da Portaria de Consolidação Nº 5 do Ministério da Saúde, de 28 de setembro de 2017 (BRASIL, 2017), estabelece que a concentração mínima de cloro residual livre em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) é de 0,2 ppm (0,2 mg/l).

O cloro, assim como outro agente desinfetante, pode ser consumido pelo contato com matéria orgânica presente na água, assim como pelo contato com a parede da tubulação, principalmente se for tubulações metálicas, na qual podem ocorrer reações de oxirredução.

Nesses casos, existe uma constante de decaimento (K_w), relacionada à parede da tubulação (**Wall Coeff.**) e, para tubulações plásticas, é considerada nula.

⁵ Veja nota de rodapé nº 04, pág. 89.

De maneira simplificada, a determinação da velocidade em que o cloro é consumido é representado pelo coeficiente de reação no meio (**Bulk Coeff**), calculado pela mediante a comparação de duas medidas de concentração suficiente espeçadas no tempo, conforme representado pela **Equação 17**:

$$K_b = \frac{\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)}{\Delta t} \quad (17)$$

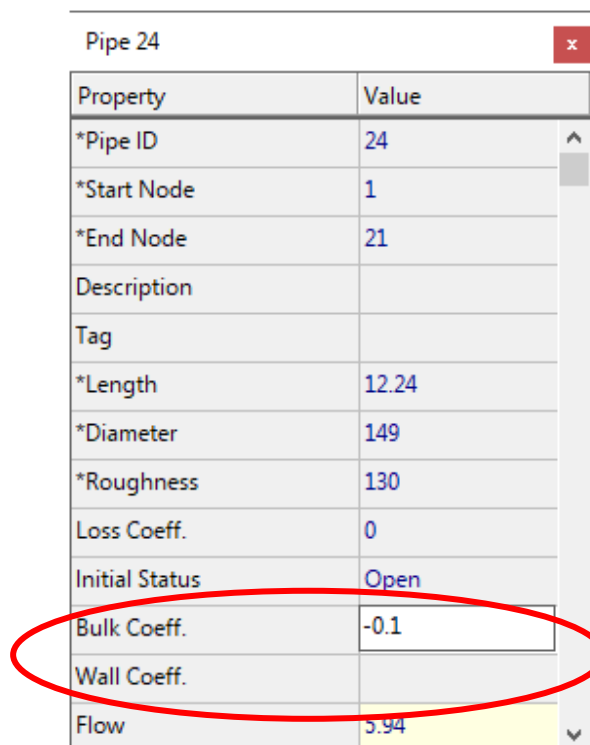
Onde: K_b é o coeficiente de reação do meio (dia^{-1}); C_t é a concentração de cloro livre na água no instante t (ppm); C_0 é a concentração de cloro livre na água no instante inicial (ppm); Δt é o intervalo de tempo transcorrido entre as duas medições da concentração de cloro livre (dias).

Salgado (2008) relacionou trabalhos referentes à determinação do parâmetro de decaimento do cloro em sistemas de distribuição de água, apontando valores para K_b entre $0,1046 \text{ dia}^{-1}$ a $0,59 \text{ dia}^{-1}$, para equações primeira ordem.

- **Estabelecendo as constantes de Reação na Tubulação:**

Tanto os coeficientes de decaimento que ocorrem na parede (**Wall Coeff.**), quanto os coeficientes que ocorrem na massa líquida (**Bulk Coef**), podem ser estabelecidos nas características das tubulações, conforme mostrado na **Figura 136**:

Figura 136: Inserindo os coeficientes K_b e K_w .



Property	Value
*Pipe ID	24
*Start Node	1
*End Node	21
Description	
Tag	
*Length	12.24
*Diameter	149
*Roughness	130
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	-0.1
Wall Coeff.	
Flow	5.94

Fonte: O autor

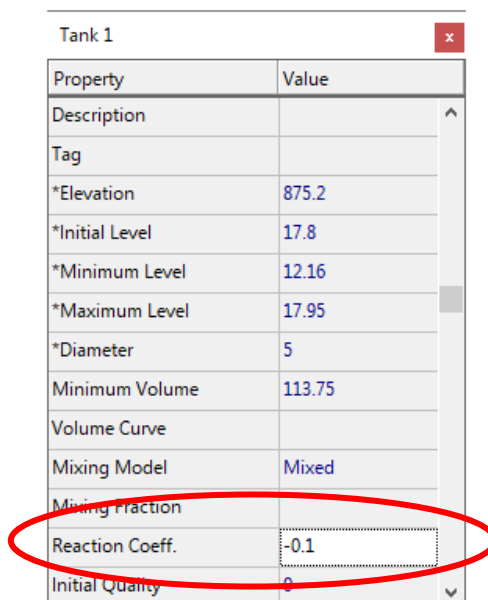
É importante salientar que, para uma correta simulação, todos os trechos de tubulações devem ter os coeficientes K_b e/ou K_w estabelecidos.

- **Estabelecendo a constante de Reação no Reservatório de distribuição de água:**

Assim como a rede de distribuição, no reservatório de água também ocorre o decaimento do cloro. Assim, é necessário estabelecer a constante cinética de decaimento. Para o reservatório, a constante de decaimento engloba tanto o decaimento na massa líquida quanto o decaimento pela reação que pode ocorrer na parede (o que deve ser evitado por questões estruturais).

A **Figura 137** ilustra o campo para definição da constante de reação (**Reaction Coeff.**):

Figura 137: Preenchimento do coeficiente de reação estabelecido para o Reservatório.



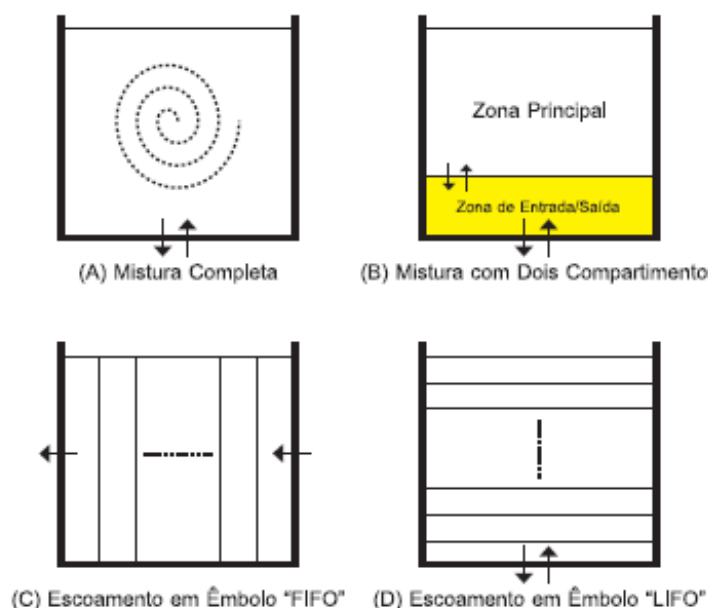
Property	Value
Description	
Tag	
*Elevation	875.2
*Initial Level	17.8
*Minimum Level	12.16
*Maximum Level	17.95
*Diameter	5
Minimum Volume	113.75
Volume Curve	
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	
Reaction Coeff.	-0.1
Initial Quantity	0

Fonte: autor

O EPANET permite utilizar quatro tipos diferentes de modelos para caracterizar as reações de mistura (**Mixing Model**) no interior de reservatórios de nível variável: (a) Mistura completa (**Mixed**); (b) Mistura com dois compartimentos (**2Comp**); (c) Escoamento em êmbolo FIFO (**First in First Out**); (d) Escoamento em Êmbolo LIFO (**Last in First Out**), conforme apresentados na

Figura 138.

Figura 138: Modelos de mistura aplicáveis em reservatórios de nível variável (**Tank**).



Fonte: Adaptado de ROSSMAN (2000).

- **Estabelecendo as condições da Fonte geradora de Cloro:**

Em um sistema de abastecimento de água, o agente desinfetante é introduzido como uma das últimas etapas do tratamento de água.

No caso da utilização de manancial subterrâneo, é comum que a desinfecção seja feita pelo emprego de hipoclorito de sódio, que nas condições comerciais possui 12% de cloro livre. O hipoclorito, nesse caso, é introduzido na linha de recalque que alimenta o reservatório, ou mesmo diretamente no reservatório.

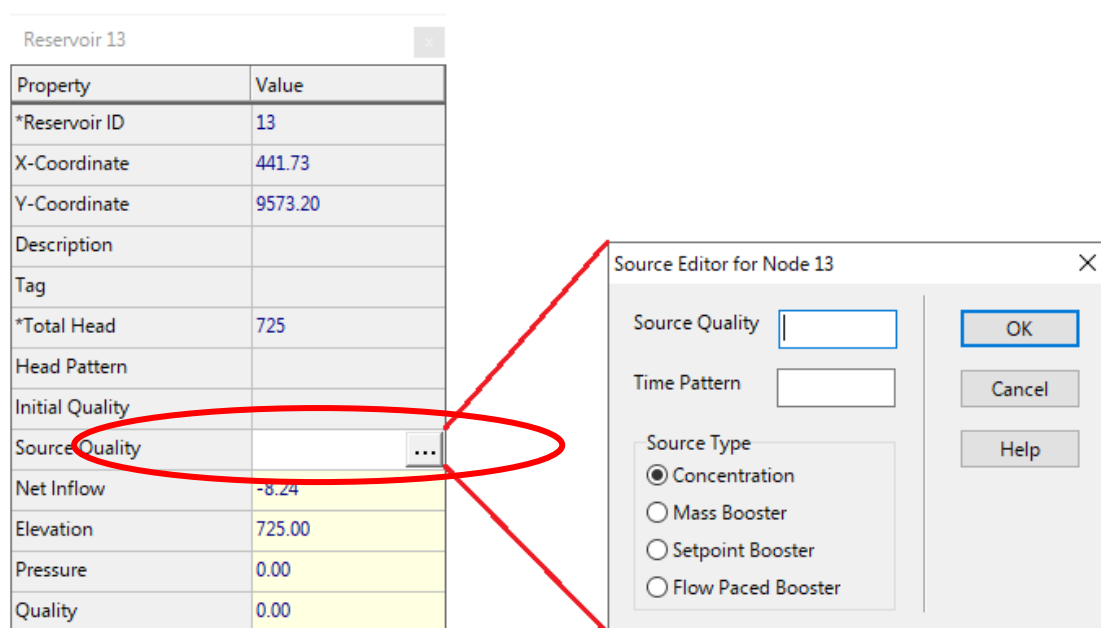
De qualquer maneira, a água que sai do reservatório deve possuir a concentração de cloro livre estabelecida pelo operador e de acordo com as normas de potabilidade.

Dessa maneira, para efeito de modelagem (e apenas de modelagem!), pode-se estabelecer o aquífero como a fonte de qualidade (**Source Quality**).

Ao clicar sobre o reservatório de nível constante que simula o manancial subterrâneo, vê-se a opção Fonte de Qualidade (**Source Quality**). Ao clicar sobre o ícone , é apresentado o Editor da fonte.

A **Figura 139** ilustra a caracterização do manancial subterrâneo como fonte do parâmetro de qualidade.

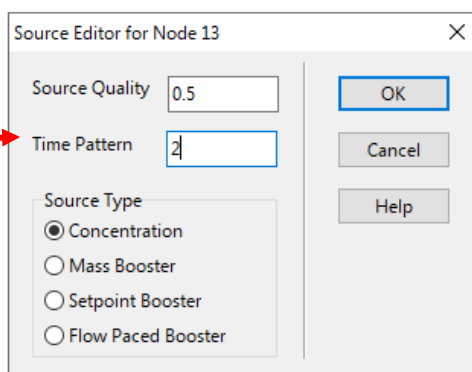
Figura 139: Caracterização do manancial subterrâneo como fonte do parâmetro de qualidade.



Fonte: O autor

No editor da fonte de qualidade, escolha **Concentração (Concentration)** no tipo de Fonte e insira a concentração de cloro livre desejada no campo **Source Quality** e estabeleça um padrão temporal para a fonte de qualidade conforme indicado na *Erro! Fonte de referência não encontrada.* e **Figura 141**.

Figura 140: Estabelecendo a concentração e o padrão temporal da fonte.



Fonte: O autor

Figura 141: Criando o padrão temporal para a fonte de concentração de cloro.



Fonte: O autor

Ao fazê-lo, o nó, no caso o manancial subterrâneo, recebe um sinal “+” sobre ele, indicando que ele é uma fonte de determinado parâmetro de qualidade, conforme indicado na **Figura 142**

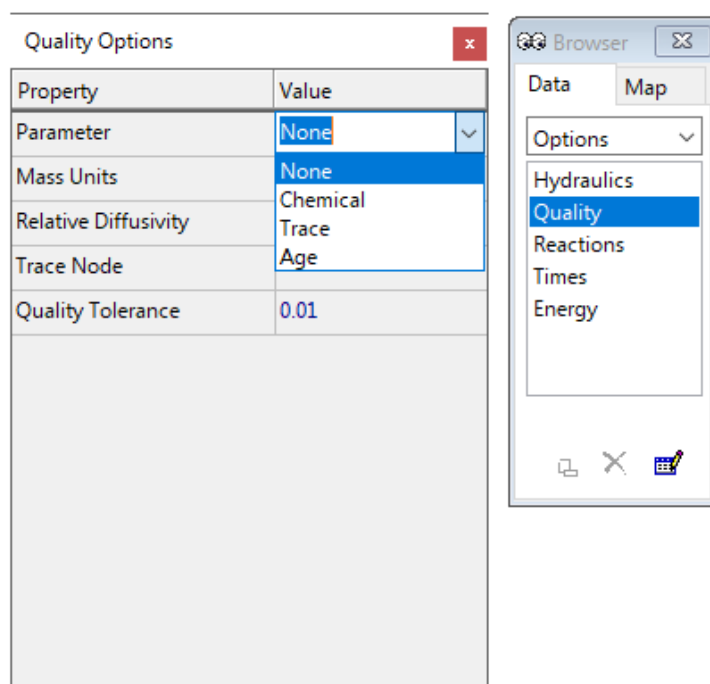
Figura 142: Representação gráfica usada pelo EPANET para estabelecer uma fonte de qualidade.



Fonte: O autor

Agora, no visualizador/navegador (**Browser**) do EPANET, na aba **Dados (Data)**, escolha **Opções (Options)** >>> **Qualidade (Quality)** e, em parâmetros escolha **Chemical**, conforme indicado na *Erro! Fonte de referência não encontrada.*

Figura 143: Estabelecendo as opções para a análise da Qualidade.

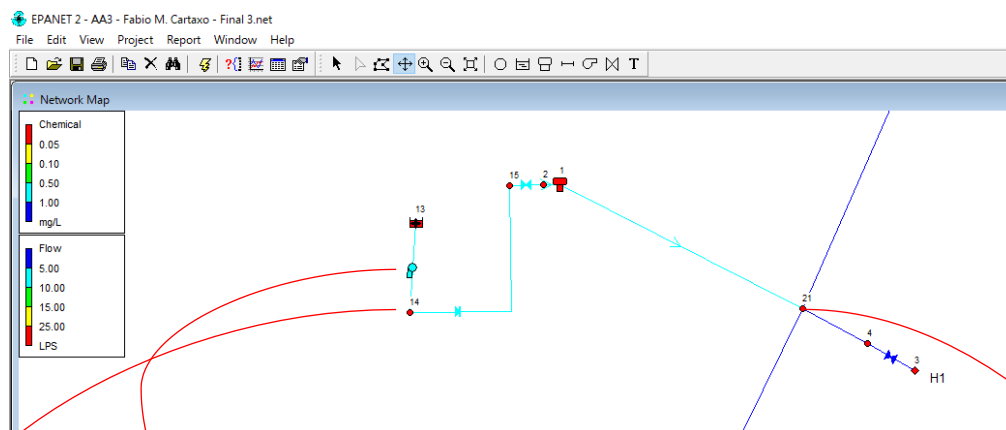


Fonte: O autor

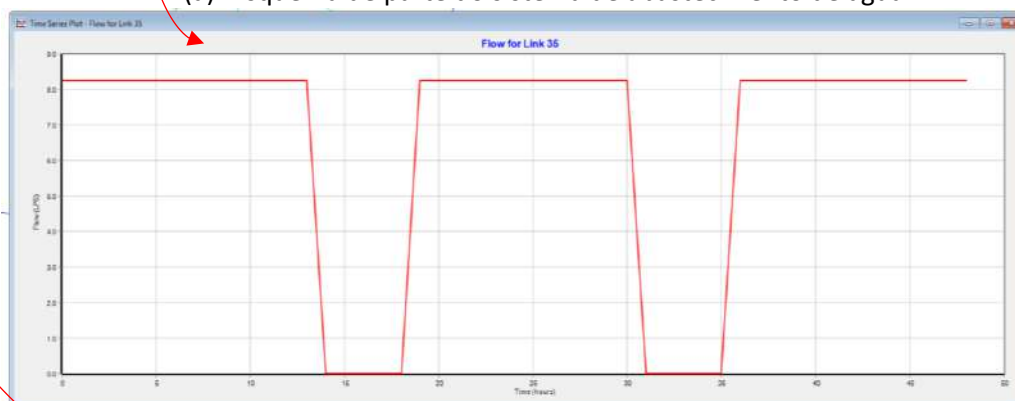
Após rodar (**Run**) o modelo hidráulico-qualitativo, é possível obter a concentração de cloro livre para qualquer nó ao longo do tempo simulado.

A **Figura 144** ilustra uma simulação qualquer. Nela, é possível perceber que, embora a água que esteja entrando no reservatório de distribuição possua concentração de cloro livre de 0,6 ppm, ao sair do mesmo reservatório, a concentração é inferior, devido à taxa de consumo do cloro no interior do reservatório e ao tempo que a água permaneceu nele.

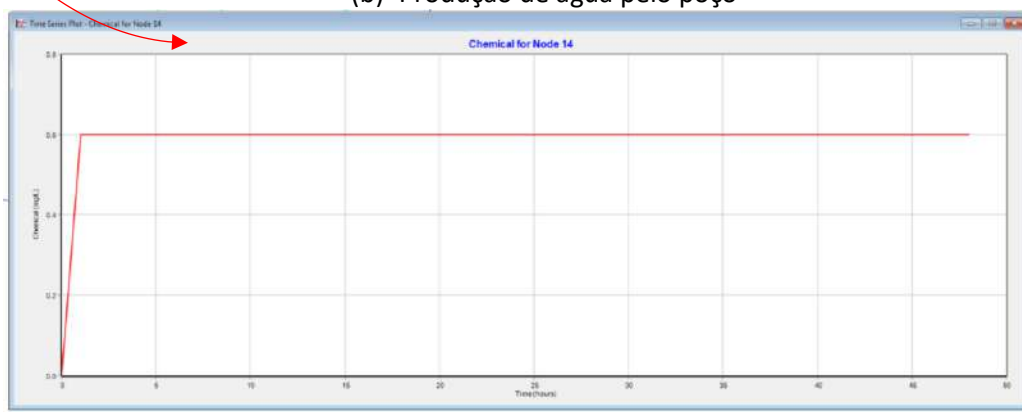
Figura 144: Avaliação da variação da concentração de cloro livre na saída do reservatório.



(a) Esquema de parte do sistema de abastecimento de água



(b) Produção de água pelo poço



(c) Concentração de cloro na entrada do reservatório



(d) Concentração de cloro na saída do reservatório

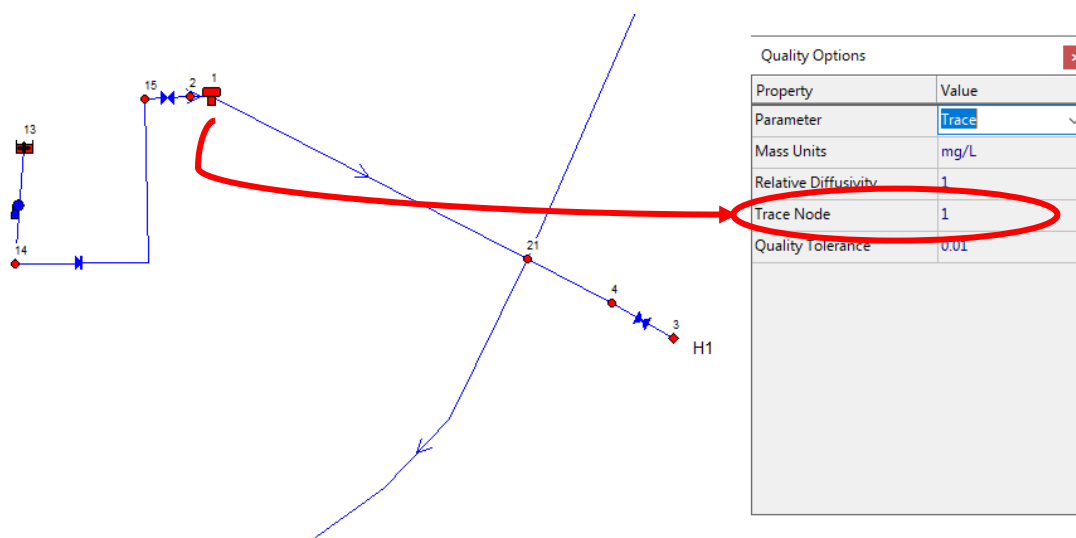
Fonte: O autor

6.5.2 Determinação do tempo de percurso da água

No visualizador/navegador (**Browser**) do EPANET, na aba **Data >>> Options >>> Quality**, há a função **Tracer**, ou traçador, conforme pode ser visualizada na **Figura 141**.

A função Traçador (**Tracer**) permite rastrear o tempo e o percentual que um traçador, lançado em um determinado nó (**Trace Node**) que a qualquer outro nó verificável. Normalmente o nó onde é lançado o traçador (**Trace Node**) é estabelecido em um reservatório, conforme mostrado na **Figura 145**.

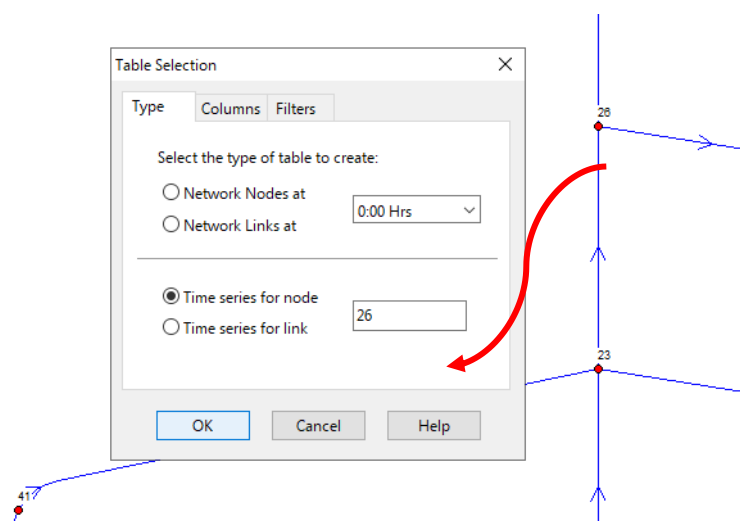
Figura 145: Definindo o "Trace Node".



Fonte: O autor

Após rodar (**Run**) o modelo, é possível obter, por gráfico ou tabela, o tempo de chegada do traçador e a variação do percentual da concentração desse traçador, para um determinado nó escolhido, conforme mostrado na **Figura 146**.

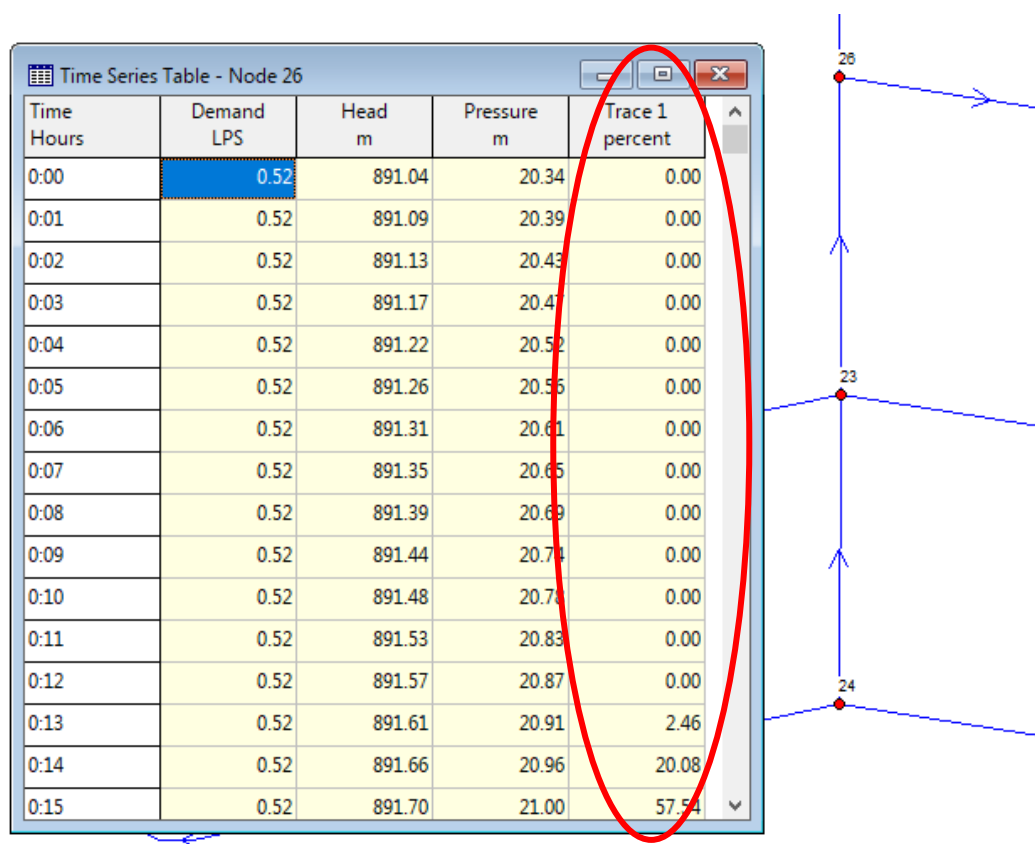
Figura 146: Escolhendo um nó para obtenção do resultado do tempo de percurso.



Fonte: O autor

A **Figura 147** ilustra, entre outros resultados característicos de um determinado nó, a variação da concentração do traçador:

Figura 147: Resultados da série temporal, em especial a variação do traçador para um determinado nó.



Fonte: O autor

Ao analisar os resultados da distribuição do traçador apresentados na **Figura 147**, percebe-se que até 12 minutos (0h12) nenhum percentual do traçador teria chegado até aquele nó; aos 13 minutos após lançado o traçador no reservatório, 2,46% do traçador conservativo chegava ao nó, e assim sucessivamente, até se obter 100% da concentração do traçador.

Voltando à questão da desinfecção da água, foi mencionado anteriormente que, ao se utilizar manancial subterrâneo, a aplicação do hipoclorito é feita na entrada do reservatório ou no próprio reservatório de abastecimento. No entanto, o processo de desinfecção precisa que o agente desinfetante fique por um determinado tempo em contato com a água antes de ser distribuída para o consumo, o chamado, tempo de contato.

O tempo de contato depende da temperatura da água e da concentração de desinfetante utilizada. Esse tempo mínimo é estabelecido pelos Anexos 4 e 5, do Anexo XX⁶ da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017). Por exemplo: ao aplicar 0,8ppm de cloro livre na água, com pH=6,5 e temperatura de 15°C, o tempo de contato mínimo é de 11 minutos, ou seja, a água precisa ficar em contato com o agente desinfetante por, pelo menos, 11 minutos antes de ser distribuída para consumo.

⁶ Veja nota de rodapé nº 04, pág. 89.

Se o nó considerado na **Figura 147** representasse o primeiro nó a ser atendido pelo reservatório, o problema estaria resolvido, pois a água levaria próximo de 12 minutos para chegar até o nó, enquanto o tempo de contato mínimo era de 11 minutos, conforme exemplificado.

Quando isso não ocorre, deve-se prever um tanque de contato, ou manter um volume de água no reservatório estabelecendo o nível mínimo operacional (o ponto de ligar a bomba).

6.5.3 *Determinando a Idade da Água (ou tempo de Residência)*

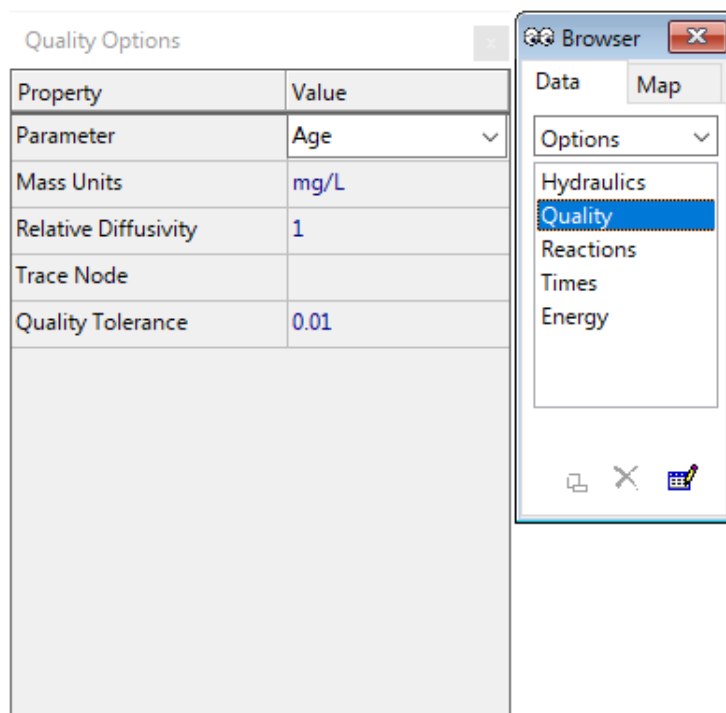
A idade (**Age**) da água, ou tempo de residência, é o tempo médio estimado para que uma parcela da água, localizada em um determinado nó, permaneça no sistema de distribuição. Assim, quando maior o tempo de residência, maior é o tempo que a água demora para percorrer o sistema de distribuição.

Enquanto os reservatórios de nível constante (**Reservoir**) ou nós modelados como fonte de suprimento de água possuem tempo de residência zero, nós com elevados tempos de residência são pontos que requerem atenção das equipes operacionais de um sistema de abastecimento, pois são potenciais pontos de baixa concentração de cloro livre, já que a água ali possui idade avançada.

Para determinar a idade (**Age**) da água, basta o usuário reconfigurar o Editor de Qualidade, escolhendo no visualizador/navegador (**Browser**) do EPANET, na aba **Data**, opção **Quality**, conforme apresentado na

Figura 148.

Figura 148: Configurando o Editor de Qualidade para determinar a Idade (**Age**) da água.



Fonte: O autor

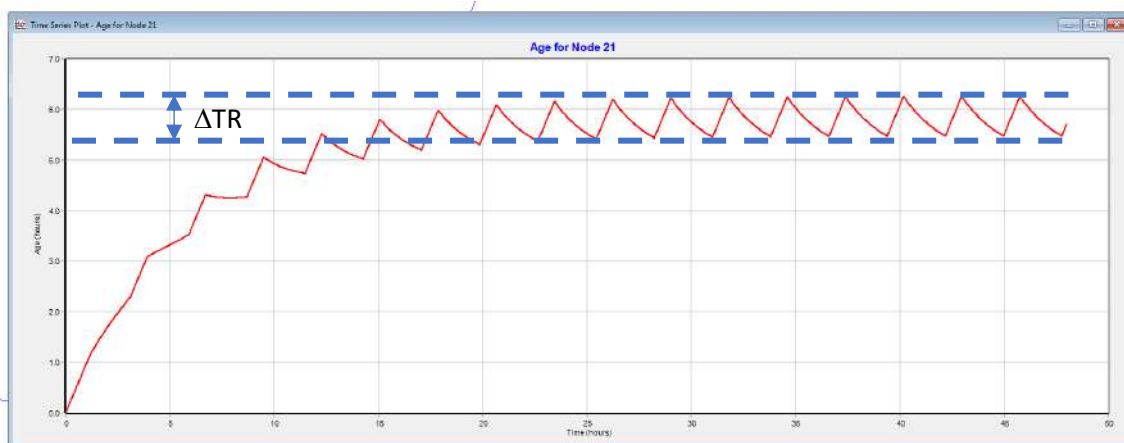
Após rodar (**Run**) o modelo, com a opção Idade (**Age**) selecionada, é possível obter o tempo de residência de qualquer nó.

A **Figura 149** apresenta curvas de período de residência de diferentes nós para um determinado sistema de abastecimento.

Figura 149: Curvas de Tempo de Residência para diferentes nós em um sistema de abastecimento de água.



(a) Tempo de Residência para uma ponta seca.



(b) Variação do Tempo de Residência para um nó da rede de distribuição de água.

Fonte: O autor

Na **Figura 149.a**, é possível perceber que, quanto maior o tempo de simulação (eixo X), maior será o tempo de residência (eixo Y) da água naquele nó, indicando que a água não circula, permanecendo indefinidamente naquele ponto.

A **Figura 149.b** apresenta uma curva que, após estabilização, varia o Tempo de Residência em ΔTR . Essa variação é decorrente da variação do consumo de água modelado.

7 “MODELANDO” A DESPEDIDA

Ao chegar ao final desta apostila, talvez você ainda tenha algumas perguntas. É provável que muitas dessas perguntas somente encontrem respostas com a experiência.

Assim como nas redes de distribuição de água, esta apostila buscou o equilíbrio de energia. O equilíbrio entre abordar, com certa profundidade, o que é importante acerca da modelagem de sistemas de abastecimento, sem intimidar o leitor com um volume de dados, situações e informações. Oxalá tenha conseguido!

Arrisco-me aqui a deixar um conselho de alguém que já modelou, projetou e acompanhou algumas dezenas de quilômetros de redes de distribuição de água; um conselho especial àquele(a)s que estão terminando a graduação: exercitem, exercitem, projetem e construam, errem, aprendam com os erros, corrijam e cresçam.

Se você acredita que esta apostila pode melhorar, ajude-me e envie seu e-mail para: erich.kellner@ufscar.br.

Por fim, lembre-se: há vidas para além dos modelos computacionais. Que a tela de um computador não te impeça de ver realmente a população atendida!

Bons estudos!

Erich Kellner

...durante a Pandemia da COVID-19.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12217**: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ARNALICH, Santiago. **Epanet y Cooperación**. Castellon: UMAN Ingenieria para las personas, 2007.

BARBARÁ. **Catálogo**. Rio de Janeiro, 1998. 368 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília: Ministério da Saúde, 2017. Disponível em: http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf. Acesso em: 04/05/2020.

ROSSMAN, Lewis A. **EPANET 2 Users Manual**. Cincinnati, OH: EPA, 2000. 200 p. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1007WWU.PDF?Dockkey=P1007WWU.PDF>. Acesso em: 15/04/2020.

GONÇALES, Valter Galdiano; GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia (ed.). **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Editora Signus, 2006.

KELLNER, Erich; TINTI, Gabriel Duarte. Aplicação de algoritmo computacional para o dimensionamento de redes de distribuição de água. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2017. Disponível em: <http://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/rbcti/article/view/1105/2506>. Acesso em: 15/04/2020.

KSB BOMBAS SUBMERSAS. **Manual Técnico A3405.0P**. Várzea Paulista: KSB Bombas Hidráulicas AS, 2010. 26 p.

MAYS, Larry W. **Water Distribution Systems Handbook**. New York: Mc Graw-Hill, 1999.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. EESC/USP, 1998.

ROSSMAN, Lewis E. **EPANET 2.0 Manual do Usuário**. Tradução Heber Pimentel Gomes; Moisés Menezes Salvino. [João Pessoa]: LENHS/UFPB, 2009.

SALGADO, Sérgio Ricardo Toledo. **Estudo dos parâmetros do decaimento do cloro residual em sistemas de distribuição de água tratada considerando vazamento**. Dissertação (Mestre em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SAINT-GOBAIN. **Catálogo Saint-Gobain Canalização**. 2015. Disponível em: https://www.sgpam.com.br/sites/default/files/catalogo_geral.pdf. Acesso em: 03/05/2020.

TIGRE. **Catálogo técnico**: Infraestrutura-Água. Disponível em:
<https://tigresite.s3.amazonaws.com/2021/12/ct-infraestrutura-agua.pdf>. Acesso em:
05/05/2022.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. São Carlos: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 659p.