



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GABRIEL LOUIZ SILVA DA COSTA

**UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE EPANET 2.0 PARA AUXÍLIO EM ESTUDO
DE HIDRÁULICA BÁSICA E SISTEMAS DE ABASTECIMENTO**

MOSSORÓ

2018

GABRIEL LOUIZ SILVA DA COSTA

**UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE EPANET 2.0 PARA AUXÍLIO EM ESTUDO
DE HIDRÁULICA BÁSICA E SISTEMAS DE ABASTECIMENTO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr Sérgio Weine Paulino Chaves

MOSSORÓ

2018

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

C838u COSTA, GABRIEL LOUIZ SILVA DA.

UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE EPANET 2.0 PARA AUXÍLIO
EM ESTUDO DE HIDRÁULICA BÁSICA E SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO / GABRIEL LOUIZ SILVA DA COSTA. -
2018.

74 f. : il.

Orientador: SÉRGIO WEINE PAULINO CHAVES.

Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Hidráulica. 2. Simulações. 3. EPANET. 4.
Orifício. 5. Recalque. I. CHAVES, SÉRGIO WEINE
PAULINO, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GABRIEL LOUIZ SILVA DA COSTA

**UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE EPANET 2.0 PARA AUXÍLIO EM ESTUDO
DE HIDRÁULICA BÁSICA E SISTEMAS DE ABASTECIMENTO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 19 / 04 / 2018.

BANCA EXAMINADORA

Sérgio WP Chaves.
Prof. Dr. Sérgio Weine Paulino Chaves (UFERSA)
Presidente

Vladimir Batista Figueiredo
Prof. Dr. Vladimir Batista Figueiredo (UFERSA)
Membro Examinador

Indalécio Dutra
Prof. Dr. Indalécio Dutra (UFERSA)
Membro Examinado

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a vida e a saúde que tenho, permitindo que enfrente a minha jornada a cada dia, que, apesar de às vezes ser árdua, é sempre recompensadora.

Agradeço ao meu pai, Alfredo, à minha mãe, Ozanete, e minha irmã, Louise, por todo o apoio irrestrito que sempre me foi dado, sem o qual não conseguiria ter alcançado os objetivos já conquistados.

Também ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Weine Paulilno Chaves, que me ajudou a encontrar o melhor caminho a seguir no trabalho, com suas sugestões e correções sugeridas, cumprindo fielmente o papel que aceitou de me ter como orientando.

Agradeço a todos os professores que em algum momento me repassaram algum aprendizado, pois reconheço como virtuosa a tarefa de dedicar as horas de seus dias para promover o desenvolvimento da sociedade.

Também às instituições pelas quais passei, que foram o Colégio Sagrado Coração de Maria, o IFRN Campus Mossoró e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido pelas oportunidades que me foram dadas.

À todos os internos e aderentes do Movimento dos Focolares, que estiveram juntos comigo na busca pelo Ideal de Unidade.

Agradeço aos meus amigos do trabalho, que também acabaram me apoiando nesse período da graduação, me incentivando a superar todas as dificuldades enfrentadas.

Aos meus amigos da vida e à minha namorada, que estiveram sempre que puderam me apoiaram e compartilharam momentos de felicidade. Alguns grupos merecem ser citados, são eles o “Grupo da Praia Original”, os “Malakias” do IFRN, os amigos do CSCM, e os companheiros da volta da UFERSA para casa.

RESUMO

As ferramentas computacionais são cada vez mais utilizadas nas diferentes atividades desempenhadas pelos profissionais, sendo na engenharia, talvez, de forma mais acentuada. O presente trabalho estuda o SOFTWARE EPANET 2.0 quando utilizado para realizar simulações que envolvam conhecimentos básicos em hidráulica, buscando a interação da ferramenta com o aprendizado na disciplina de hidráulica. O trabalho serve também como manual para novos usuários do software, que podem se orientar por meio das explicações e imagens obtidas através de *screenshots*. O trabalho com o EPANET foi realizado usando quatro simulações, das quais, duas delas foram feitas utilizando teorias básicas de orifícios e escoamento em canais. As outras duas simulações foram aplicadas em situações reais de projetos de hidráulica e abastecimento. Para os sistemas elevatórios, nas duas últimas simulações, devido à capacidade de executar inúmeras iterações em pouco tempo, se apresentou muito vantajoso para descobrir pontos de funcionamento e entender o funcionamento de outros elementos. Já para as aplicações em orifícios, o resultado para esvaziamento de um tanque apresentou imprecisões, pois os métodos numéricos computacionais não representaram bem o valor de integrais calculadas algebricamente. E, para o escoamento em canais, a utilização do software se mostrou bastante vantajosa com problemas hidraulicamente determinados. Por fim, considerou-se possível utilizar o programa para ensino de teorias básicas e principalmente por permitir o desenvolvimento da cognição e familiarizar com esse tipo de ferramenta, dando possibilidades para que após o primeiro contato, haja despertar de interesse e consequente aprofundamento.

Palavras-Chave: Hidráulica. Simulações. EPANET. Orifício. Recalque.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manancial superficial (Barragem Armando Ribeiro Gonçalves)	18
Figura 2 – Captação em mananciais: Captação direta sobre balsa (A) (Fonte: Autoria própria) e Diagrama de um poço sob bombeamento (B) (Fonte: Adaptado de DACACH, 1975)	19
Figura 3 – Captação em mananciais	20
Figura 4 – Filtros ascendentes em Estação de Tratamento de Água da CAERN: ETA com filtros de fibra (A) e ETA convencional (B)	21
Figura 5 – Reservatório elevado localizado no Ulrich Graff – Mossoró -RN	22
Figura 6 – Conduitos em traçados de grelha (A) e anéis principais (B)	23
Figura 7 – Gráfico indicando curva do sistema e ponto de funcionamento	27
Figura 8 – Fluxograma com classificação do escoamento quanto às propriedades hidráulicas.	31
Figura 9 – Diagrama de Moody com classificação do escoamento.....	35
Figura 10 – Esboço de levantamento topográfico da comunidade de Macundú-RJ..	43
Figura 11 – Esquema do Sistema de Adução Taquacetuba	45
Figura 12 – Aparência inicial do software EPANET	47
Figura 13 – Elementos físicos	48
Figura 14 – Lista suspensa para escolha do tipo de válvula	49
Figura 15 – Vazão de trecho à jusante do Stand-Pipe	50
Figura 16 – Resultado para pressão negativa.....	51
Figura 17 – Vazão utilizando fórmula para escoamento livre	52
Figura 18 – Resultado para problema hidráulicamente determinado	53
Figura 19 – Resultado para problema com três trechos de diferentes diâmetros.	54
Figura 20 – Primeiros pontos e trechos.....	55
Figura 16 – Detalhe de indicação do sentido da bomba	55
Figura 22 – Caixa de diálogo onde são indicadas as propriedades	56
Figura 23 – Página de dados	56
Figura 24 – Página de dados: Gráfico 17 MS 03 - 10 CV (A), Tabela obtida (B) e Gráfico após inserção no programa (C)	57
Figura 25– Página de dados: Gráfico 697 TJM - 20 CV (A), Tabela obtida (B) e Gráfico após inserção no programa (C).....	58
Figura 26 – Página de dados	59

Figura 27 – Mapa após simulação	60
Figura 28 – Sistema de recalque sobre imagem de fundo	61
Figura 29 – Mapa após simulação	62
Figura 30 – Erro detectado por causa de pressões negativas	63
Figura 31 – Controle programado utilizado	64
Figura 32 – Gráficos extraídos após simulação: pressão para nos nós (A) e vazão nos trechos (B)	65
Figura 33 – Representação na interface do programa	66
Figura 34 – Esquema já montado no programa: Curva para bombas nos flutuantes (A) e Curva para bombas na elevatória (B).....	66
Figura 35 – Vazão de trecho à jusante do Stand-Pipe	68
Figura 36 – Formato dos gráficos de vazão à jusante (A) e de carga hidráulica (B) do Stand-Pipe.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Formato de curvas características de uma bomba centrífuga	25
Gráfico 2 – Gráfico de curvas características de bomba centrífuga fornecida pelo fabricante.....	25
Gráfico 3 – Indicação de curva do sistema e ponto de funcionamento	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de acréscimo de potência no motor para folga no sistema.	28
Tabela 2 – Valores das rugosidades internas de tubos em milímetros	35
Tabela 3 – Valores de coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams	36
Tabela 4 – Dados utilizados na tubulação de recalque sucção.....	44
Tabela 5 – Tabela com erros relativos	51
Tabela 6 – Comparativo de resultados.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Q - Vazão

P – Pressão exercida por um conjunto de partículas qualquer

ρ – Massa específica de uma substância qualquer

γ_i – Peso específico de uma substância qualquer i

D_i – Diâmetro de uma área circular

e – Rugosidade de um material

V_i – Velocidade média de um conjunto de partículas

L – Comprimento de uma tubulação

μ_i – Viscosidade dinâmica de um fluido i

k – Coeficiente dependente de rugosidade

ϑ_i – Viscosidade cinemática de um fluido i

A_i – Área de uma região circular

Z_1 – Posição vertical ou Carga de Posição

g – Aceleração gravitacional

Δh – Perda de carga total

$\Delta h'$ - Perda de carga contínua num conduto forçado

Δh_c - Perda de carga localizada

K – Coeficiente de perda de carga localizada

K' – Valor que depende da natureza das paredes dos tubos, no caso do regime turbulento

D^m – Potência de um diâmetro de tubulação

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)^r$ - Potência da relação entre viscosidade e densidade de um tubo

Re – Número de Reynolds

f – Coeficiente de perda de carga (Usada na fórmula universal)

CAERN – Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte

ETA – Estação de Tratamento de Água

C – Coeficiente de perda de carga (Usado na fórmula Hazen-Williams)

h_s – Altura geométrica na sucção

h_r – Altura geométrica no recalque

$\sum h_{fs}$ – Perda de carga na tubulação de sucção

$\sum h_{fr}$ – Perda de carga na tubulação de recalque

P_2 – Pressão residual

h_m – Altura manométrica

P_2 – Potência fornecida ao líquido no recalque

P_3 – Potência consumida pela bomba

P_4 – Potência do motor

η – Rendimento

NPSHr – Net Positive Suction Head Requerido

NPSHd – Net Positive Suction Head Disponível

P_a – Pressão atmosférica

P_v – Pressão de vapor

Z – Diferença de nível geométrico

C_d – Coeficiente de descarga de um orifício

S – Área da superfície líquida

H – Carga hidráulica

C_{ch} – Coeficiente de Chézy para escoamento em condutos livres

R_h – Raio Hidráulico

I = perda de carga unitária

n - Rugosidade de Manning

T – período em horas de funcionamento da bomba por dia

K_1 – Coeficiente para hora de maior consumo

TAU – Tanque de Alimentação unidirecional

RNF – Reservatório de Nível Variado

RNV – Reservatório de Nível Fixo

PRV – Válvula Redutora de Pressão

PSV – Válvula Sustentadora de Pressão

PBV – Válvula de Perda de Carga Fixa

FCV – Válvula Reguladora de Vazão

TCV – Válvula de Borboleta

GPV – Válvula Genérica

CV – Unidade de Potência em Cavalo Vapor

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL	17
2.2	ESPECÍFICO	17
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	SISTEMAS DE ABASTECIMENTOD DE ÁGUA.....	18
3.1.1	Captação.....	18
3.1.2	Adução	20
3.1.3	Tratamento.....	21
3.1.4	Reservação	21
3.1.5	Redes de distribuição.....	22
3.1.6	Sistemas elevatórios	24
3.1.6.1	Bombas Centrífugas.....	24
3.1.6.2	Processo de escolha de uma bomba	27
3.1.7	Outros elementos acessórios dos sistemas de distribuição.	29
3.2	TEORIA HIDRÁULICA APLICADA AOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO HUMANO 30	
3.2.1	Classificação dos movimentos	30
3.2.2	Equações hidráulicas básicas	32
3.2.3	Perda de carga.....	32
3.2.3.1	Fórmula Universal	33
3.2.3.2	Determinação do coeficiente de atrito f	33
3.2.3.3	Equação da Hazen-Willians	36
3.2.3.4	Orifícios em descarga livre.....	36
3.2.3.5	Fórmula de Chézy-Manning para condutos livres, circulares e totalmente cheios 37	

3.3	PROCESSOS NUMÉRICOS AUXILIADOS POR COMPUTADORES APLICADOS AO ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	38
3.3.1	Softwares Utilizados.....	38
3.3.2	EPANET.....	39
3.3.2.1	Exemplos de trabalhos apresentados utilizando o EPANET.....	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1.1	APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO EM ORIFÍCIO DE DESCARGA LIVRE	41
4.2	APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO LIVRE EM CONDUTO À SEÇÃO PLENA.....	42
4.3	SIMULAÇÃO DE VERIFICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE RECALQUE EM MACUNDÚ.....	42
4.4	SIMULAÇÃO DO SISTEMA TAQUACETUBA DE TRANSFERÊNCIA DE VOLUMES	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO EM ORIFÍCIO DE DESCARGA LIVRE	49
5.2	APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO LIVRE EM CONDUTO À SEÇÃO PLENA.....	52
5.3	SIMULAÇÃO DE VERIFICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE RECALQUE EM MACUNDÚ.....	54
5.3.1	Simulação estática	59
5.3.2	Simulação dinâmica	61
5.3.3	Controles programados.....	63
5.4	SIMULAÇÃO DO SISTEMA TAQUACETUBA DE TRANSFERÊNCIA DE VOLUMES	65
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
6.1	CONCLUSÕES.....	72
6.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72

7.	REFERÊNCIAS.....	73
----	------------------	----

1. INTRODUÇÃO

As profissões possuem sua importância de acordo com seu papel exercido dentro da sociedade. Para que sejam bem executados, precisam acompanhar constantemente as evoluções que ocorrem em relação às informações, métodos, processos, ou tudo aquilo que estiver relacionado e influencie em sua boa execução. Para as engenharias, a revolução tecnológica trouxe diversas novas vantagens e ferramentas, sendo necessário que os profissionais estejam cada vez mais bem relacionados com essa tecnologia, que podem ser aplicadas utilizando como meio ou fim os métodos computacionais.

Os processos de ensino e aprendizagem necessitam acompanhar a evolução das demandas de qualidades que são exigidas aos profissionais no mercado de trabalho e, de forma mais ampla, pela própria sociedade. A partir desta ótica, torna-se imprescindível que os novos profissionais sejam apresentados, ainda durante a sua formação, às novas possibilidades tecnológicas, fazendo com que possuam a capacidade de atuar de acordo com essas necessidades que são exigidas.

Em relação à exigência de uso de novas tecnologias, não ocorre diferente com as engenharias civil e sanitária, quando voltadas para a atividade da distribuição de água. Diversos softwares e ferramentas computacionais já são realidade. Desses, o EPANET possui destaque devido algumas características próprias. Segundo Gaio (2010, p. 751) é a melhor opção para usuários que estão começando a usar modelos, por ser um software gratuito, também “espartano”, ou seja, exige do usuário o raciocínio para o entendimento de suas funcionalidades. Após o ganho de experiência com o EPANET é possível “migrar” para outros softwares que são disponibilizados comercialmente.

Também existem diversos trabalhos que comprovam a utilização dessa ferramenta. São exemplos o trabalho de Soares (2008) “Análise hidráulica de sistemas de distribuição de água utilizando MOC-EPANET”, o trabalho de Coutinho (2017) “Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET” e o trabalho de Antonowicz (2018) “Uso do EPANET para gerenciar distribuição de água em uma cidade inteligente”.

Portanto, utilizar o EPANET também em situações de hidráulica básica torna-se vantajoso por permitir o seu uso em disciplinas de graduação com conteúdo de

hidráulica, possibilitando primeiro contato com um método computacional voltado para esse tema.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Testar o Software EPANET 2.0 na resolução de problemas de hidráulica básica e introduzi-lo no ensino de disciplinas com conteúdo de hidráulica e sistemas de abastecimento.

2.2 ESPECÍFICO

Aplicar no EPANET 2.0 na teoria básica de hidráulica sobre escoamento de orifício delgado em descarga livre, escoamento livre em tubulações circulares, verificando o funcionamento de conjuntos moto-bomba em sistemas de recalque modelados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Em comunidades mais antigas, a água era coletada em sua forma natural, transportada pela força do homem, nos chamados *abastecimentos rudimentares* (DACACH, 1975, p. 31-32). As técnicas de exploração e distribuição foram desenvolvidas e melhoradas, ao ponto de apresentarem certa complexidade, incluindo diversos elementos, surgindo verdadeiros *sistemas* (TSUTIYA, 2006, p. 2).

Os sistemas de abastecimento de água são compostos por diversos elementos que têm a finalidade de levar a água de um ponto de captação até os pontos de consumo, que podem ser residências, indústrias, instituições, comércios, entre outros. A composição do sistema inclui a captação, adução, tratamento, reservação, distribuição e, sempre que necessário, estações elevatórias.

3.1.1 Captação

A captação é o meio pelo qual a água de um manancial, ou fonte, é retirada, iniciando-se um caminho que tem como finalidade levar a água ao processo, cujo objetivo final pode ser o consumo humano, consumo animal, agricultura irrigada, canais em perímetros irrigados, dentre outros. A forma como será realizada a captação depende do manancial utilizado para o abastecimento público.

A escolha do manancial, de superfície ou subterrâneos, deve depender de estudos e análises, que correspondem ao levantamento de dados e caracterização do tipo de manancial, com posterior apreciação dos dados coletados. Na Figura 1, manancial de superfície da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, localizada em Assú, Rio Grande do Norte.

Figura 1 – Manancial superficial (Barragem Armando Ribeiro Gonçalves)

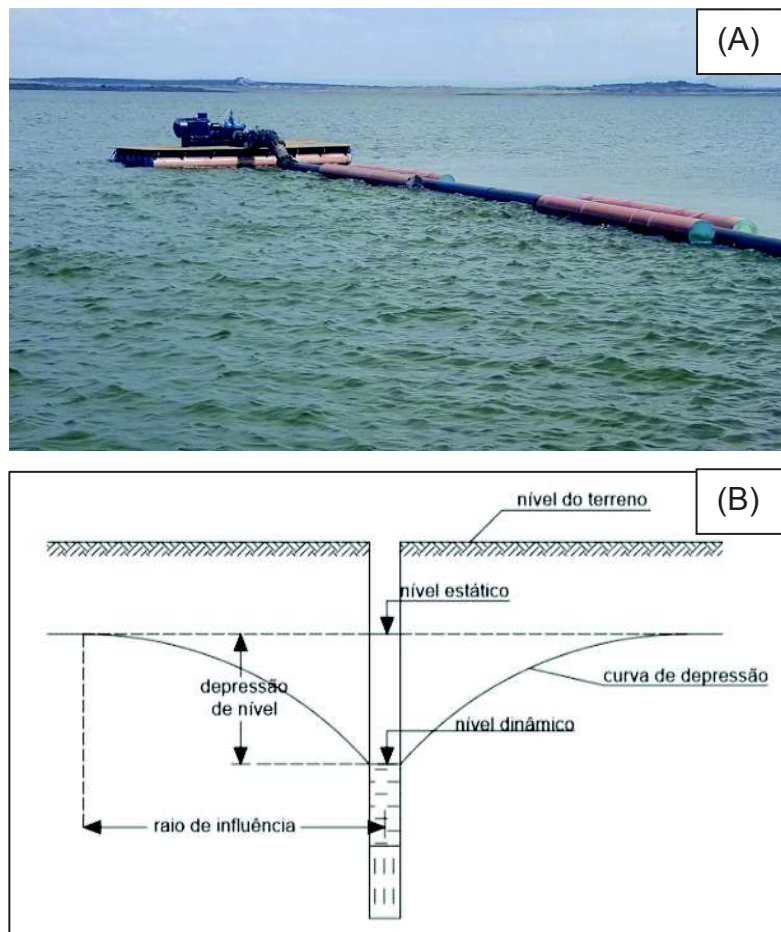


Fonte: Autoria própria

Também é necessário se escolher o tipo de captação realizada nesses mananciais. Um dos principais requisitos a ser atendido é que a vazão disponível seja à vazão necessária do usuário.

As opções de captação são diversas. Exemplos em superfície são: captação direta, ou simples tomada, barragem de nível, canal de derivação, torre de tomada e poço de derivação (PRINCE; HELLER, 2010, p. 325-347). Na Figura 2A há um exemplo de captação em manancial superficial. Em captação subterrânea, o condicionamento do lençol freático dentro da estrutura hidrogeológica determina o tipo de captação. Em caso de fontes em que a água aflora, esta chega a superfície pelos processos de dinâmica terrestre. Por outro lado, nos casos em que o lençol freático está em nível inferior ao do terreno, são confeccionados poços (PRINCE; HELLER, 2010, p. 325-347). Na Figura 2B é apresentado um diagrama de um poço sob bombeamento.

Figura 2 – Captação em mananciais: Captação direta sobre balsa (A) (Fonte: Autoria própria) e Diagrama de um poço sob bombeamento (B) (Fonte: Adaptado de DACACH, 1975)



3.1.2 Adução

A adução é o elemento do processo de transporte de água que a retira do ponto de captação até antes da distribuição, passando, ou não, por um sistema elevatório. É realizado pela adutora, que é um conduto (tubulação ou canal). A adução pode ocorrer por gravidade, quando o desnível geométrico é suficiente para assim acontecer. Caso contrário é realizada a adução por recalque. A adução pode ser de água bruta ou tratada. A adução de água bruta ocorre entre o manancial e a Estação de Tratamento de Água, enquanto a de água tratada ocorre entre a própria Estação de Tratamento e a localidade de distribuição (COELHO; BAPTISTA, 2010; HELLER, 2010, p. 441-444).

São destinadas, exclusivamente, ao transporte de água entre dois pontos principais, podendo haver, ocasionalmente, algumas derivações, onde o objetivo é que chegue a mais de uma localidade para só depois ser distribuída. Essas derivações são chamadas de sub-adutoras. Na Figura 3 um exemplo de uma adutora de ferro fundido.

As adutoras que funcionam por recalque geralmente têm o seu diâmetro escolhido pelo critério econômico. Diâmetro pequenos incidem em maiores perdas de carga, exigindo, conseqüentemente, maior altura manométrica e potência da bomba. Por outro lado, os maiores diâmetros exigem um maior custo de aquisição e instalação, enquanto exigem menor custo para aquisição dos conjuntos elevatórios.

Figura 3 – Captação em mananciais



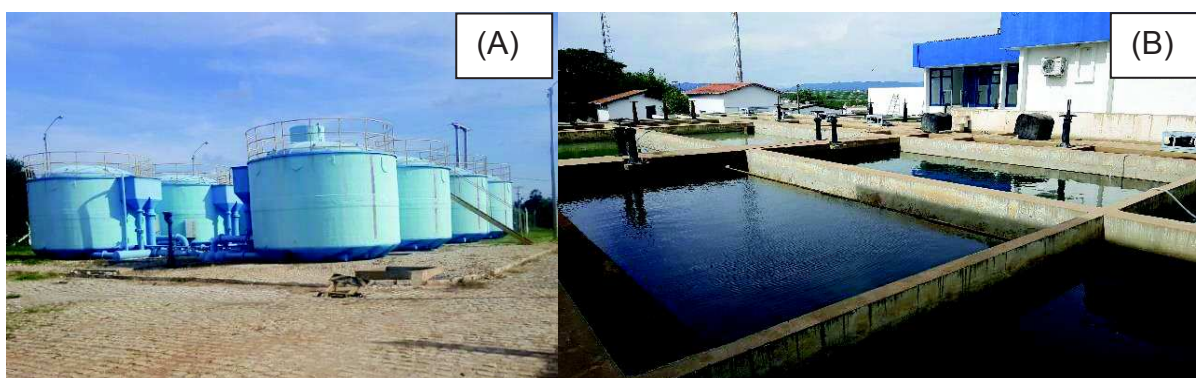
Fonte: Autoria própria

3.1.3 Tratamento

O tratamento é responsável por tornar a água potável, ou seja, inofensiva à saúde, agradável aos sentidos e adequada aos usos domésticos (DACACH, 1975, p.5). Pode ser que ocorram situações diversas onde a qualidade do manancial atenda aos especificados padrões de qualidade.

O sistema de distribuição deve oferecer vazão suficiente para atender a demanda. Na Figura 4A é mostrado exemplo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) com filtragem ascendente em tubos de fibra e na Figura 4B o de uma ETA convencional, com floculador, decantador e filtros descendentes.

Figura 4 – Filtros ascendentes em Estação de Tratamento de Água da CAERN: ETA com filtros de fibra (A) e ETA convencional (B)



Fonte: Autoria própria

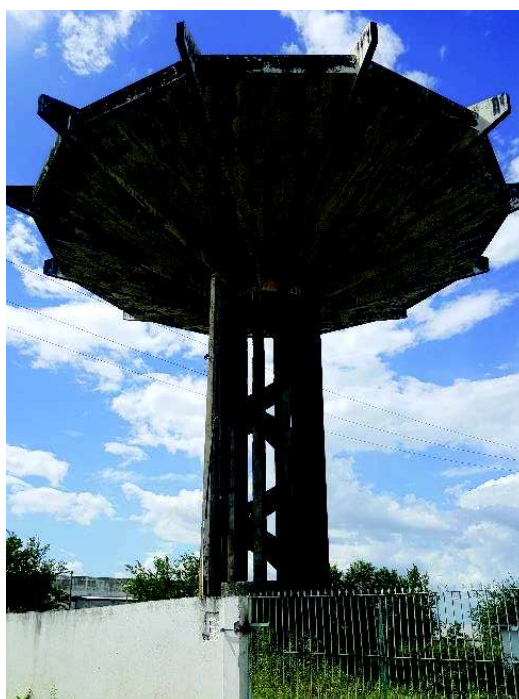
3.1.4 Reservação

Os elementos de reservação são concebidos de forma a armazenar água para regularizar vazão e pressões, que surgem devido à variação do consumo nas horas de maior e menor demanda. Nos sistemas de abastecimento geralmente é de concreto, e menos encontrado com outros materiais, com aço, alvenaria estrutural e concreto protendido.

A vazão utilizada no dimensionamento dos sistemas elevatórios se torna menor que as vazões de horas e dias de maior consumo, graças a regularização realizada pelo reservatório. Isso permite a economia de energia elétrica a partir da utilização de conjunto motobomba de menor potência. (COELHO; BAPTISTA, 2010; HELLER, 2010, p. 585).

De acordo com a localização do terreno os reservatórios podem ter diferentes classificações. Os elevados apresentam o seu fundo com cota superior à do terreno, geralmente são de menor dimensão e exercem com mais intensidade a função de manter pressões dinâmicas elevadas. Na Figura 5 há um exemplo de reservatório elevado. Os reservatórios enterrados são aqueles cuja cota de fundo é menor que a cota do terreno. Usualmente apresentam um volume maior, quando comparados aos reservatórios elevados, atuando em conjunto com estes, dentro do sistema. De forma análoga aos reservatórios enterrados estão os semienterrados, quando pelo menos um terço da altura está abaixo do nível do solo, e os apoiados, nos quais menos de um terço da altura está abaixo da cota da superfície. (COELHO; BAPTISTA 2010; HELLER, 2010, p. 589-590).

Figura 5 – Reservatório elevado localizado no Ulrich Graff – Mossoró -RN



Fonte: Autoria própria

3.1.5 Redes de distribuição

Correspondem ao conjunto de tubulações que interligam pontos da origem de distribuição ao consumidor final. Nas cidades um pouco mais urbanizadas, as tubulações seguem o traçado das ruas, tendo seu desenho final parecido com o de uma rede.

São dois os tipos de condutos presentes em uma rede de distribuição. Os condutos, ou tubulações secundárias, são as responsáveis por abastecer diretamente as edificações e apresentam, em geral, diâmetro menor. Já os condutos, ou tubulações principais, são os responsáveis por alimentarem os condutos secundários, apresentam, geralmente, maior diâmetro. Também são chamados de tubulações tronco ou condutos mestres.

Também em relação aos traçados das redes de distribuição, dois tipos de traçados são mais citados pela literatura, que são

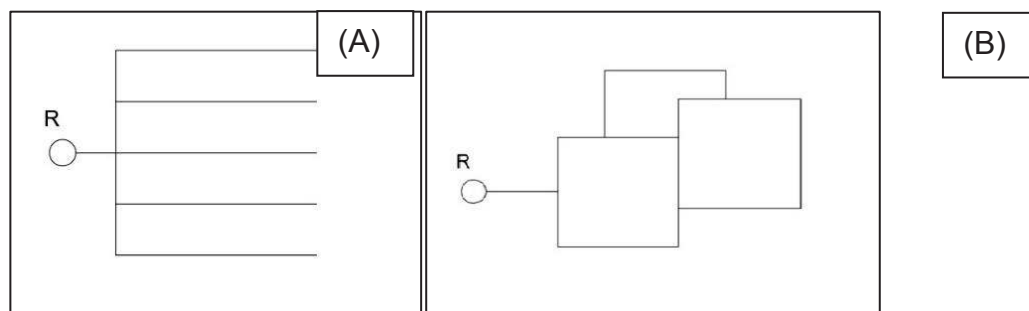
- Rede ramificada: nesse tipo de rede a tubulação é caracterizada por apresentar desenvolvimento linear, seguindo o traçado de ruas que geralmente não se cruzam, gerando, assim, pontas “mortas”;
- Rede malhada: como o nome já sugere, nesse tipo de traçado a rede de distribuição segue o desenho das ruas, tendo seu desenho apresentado como uma malha;
- Rede mista: associações de redes malhadas com redes ramificadas (TSUTIYA, 2006 p.389-394).

Também é citada na literatura a caracterização a partir do traçado das tubulações primárias (ou principais), sendo elas:

Em grelha: nesse primeiro caso, as redes apresentam características de paralelismo entre os condutos principais, que se ligam em apenas uma de suas extremidades;

Em anéis: já no segundo, as redes primárias se conectam entre si, formando circuitos fechados, ou anéis. Estes apresentam maior eficiência hidráulica (PRINCE; HELLER, 2010, p. 639). Na Figura 6 abaixo são mostrados os esquemas de redes principais em grelhas e em anéis.

Figura 6 – Condutos em traçados de grelha (A) e anéis principais (B)



Fonte: Adaptado de HELLER (2010)

3.1.6 Sistemas elevatórios

Visando fatores como economia, facilidade de instalação, manutenção e segurança, as adutoras e redes são preferencialmente projetadas de forma que funcionem em sua totalidade por gravidade. Todavia, nem sempre é possível se executar dessa forma. Para vencer desníveis entre dois pontos, como por exemplo, entre a captação e um ETA é utilizado um sistema elevatório, cujo elemento central é o conjunto motobomba. O conjunto é formado por um motor (elétrico, ou combustão), e por uma bomba. O motor movimenta a bomba, que por sua vez realiza o trabalho sobre a água, conferindo-lhe a energia necessária para vencer a altura manométrica entre os pontos final e inicial do transporte. (TSUTIYA, 2006, p. 225-226).

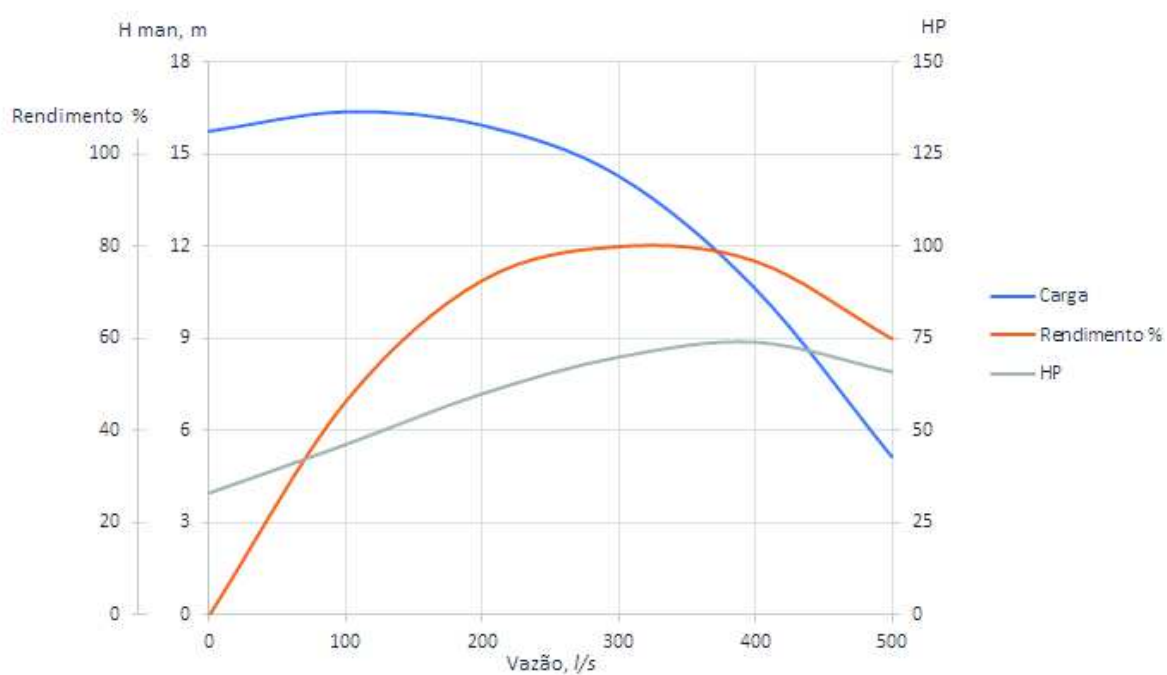
A classificação geral das bombas são: turbo bombas; bombas volumétricas; bombas especiais. As turbos bombas se subdividem em: radial; axial; e mista (HELLER, 2010). As radiais, também chamadas de bombas centrífugas, são as mais utilizadas em sistemas de abastecimento de água, por isso receberão abordagem especial no trabalho.

3.1.6.1 Bombas Centrífugas

Como já citado anteriormente, as bombas centrífugas são utilizadas em diversos tipos de aplicações devido diversos fatores. Para Dacach (1975, p. 208), são eles: economia de espaço; facilidade de conectar-se a mecanismos de grande velocidade; ao baixo preço de venda; à facilidade de operação e reparo; ao maior período de vida e; à autoproteção contra pressões elevadas.

As bombas são fabricadas para elevar uma quantidade específica de massa de água a uma determinada altura em uma unidade de tempo. Em outras palavras, a elevação até uma altura manométrica total (H_m) de certa vazão é o ponto de funcionamento ideal. Cada bomba possui sua condição ideal de funcionamento, um ponto ideal, onde apresentará maior rendimento. Cada vez que o par Q e H se afastam do ponto de funcionamento ideal, o rendimento da bomba tende a diminuir. (TSUTIYA, 2006, p; 241). No Gráfico 1 é mostrado o esquema de curvas características de uma bomba centrífuga. Já no Gráfico 2, é apresentado o gráfico de uma bomba comercial fornecido pelo fabricante.

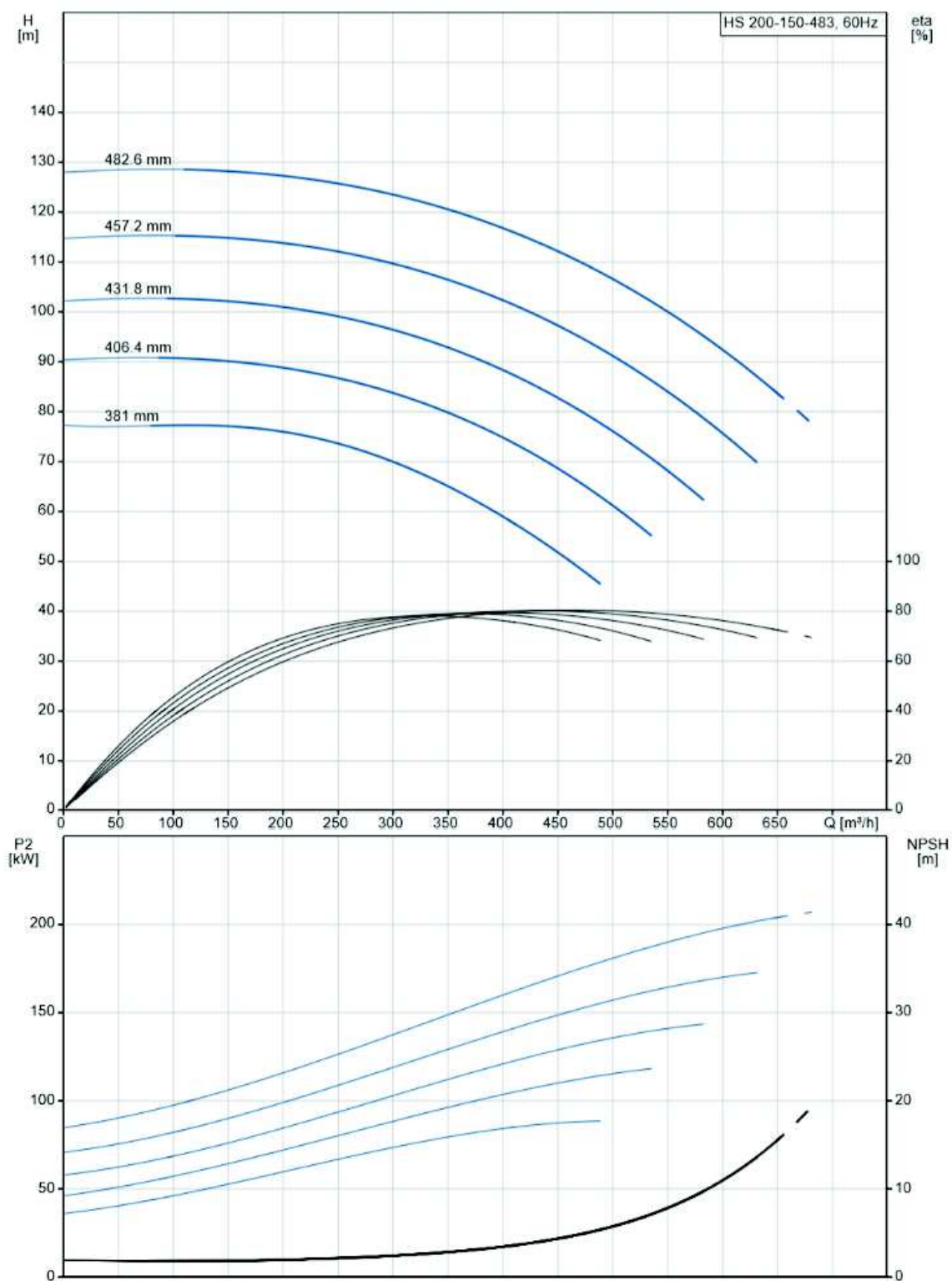
Gráfico 1 – Formato de curvas características de uma bomba centrífuga



Fonte: Autoria própria

Gráfico 2 – Gráfico de curvas características de bomba centrífuga fornecida pelo fabricante

99128757 HS 200-150-483 60 Hz



Fonte: Grundfos Product Center

3.1.6.2 Processo de escolha de uma bomba

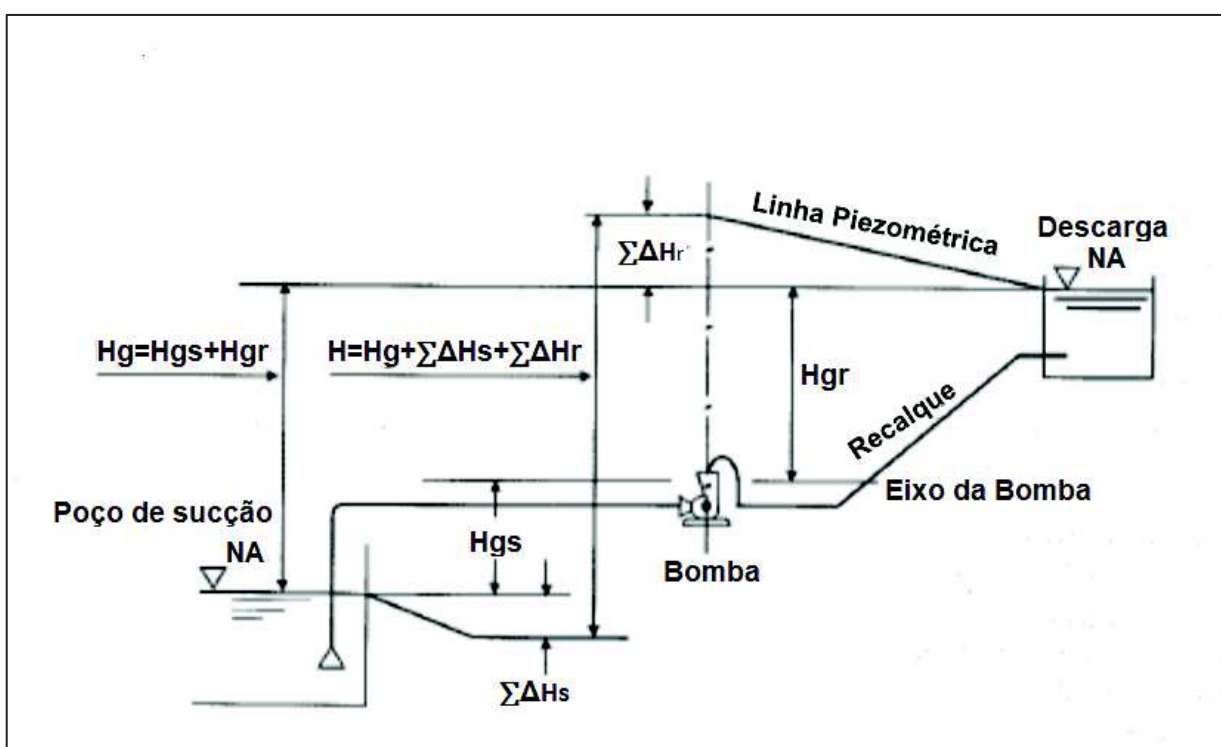
A seleção adequada de um conjunto motobomba significa maior economia e melhores condições de operação. Segundo Tsutiya (2006, p.241-243), o conjunto escolhido deve atender bem às condições de altura manométrica e vazão determinadas. A altura manométrica (H_m) é definida, na Equação 1, como a soma das alturas geométricas de sucção e recalque ($H_{gs} + H_{gr}$), acrescido da perda de carga na sucção e no recalque ($\Delta H_s + \Delta H_r$), somado à pressão necessária no ponto de descarga, se houver (P_o). A Figura 7 mostra um exemplo de composição da altura manométrica. Já a potência fornecida pela bomba ao líquido (Equação 2) depende da altura manométrica H_m , da vazão Q , e do peso específico γ do líquido transportado. Por fim, a eficiência ou rendimento da bomba (η) é a relação entre a potência que se fornece ao líquido (P_l) e a potência que é consumida (P_b) (Equação 3).

$$H_m = H_{gs} + H_{gr} + \Delta H_s + \Delta H_r + P_o \quad (1)$$

$$P_l = \gamma Q H_m \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_l}{P_b} \quad (3)$$

Figura 7 – Gráfico indicando curva do sistema e ponto de funcionamento



Fonte: Adaptado de TSUTIYA (2006)

A potência consumida pela bomba é a potência fornecida pelo motor. Portanto, este pode ser calculado. A partir do resultado, uma potência elétrica deve ser acrescida, considerando as perdas internas do motor. Abaixo estão fórmulas para a potência do motor em quilowatts e em cavalo-vapor (Equação 4) e a Tabela 1, indicando o acréscimo de potência:

$$Pot = \frac{9,8QHm}{\eta} \text{ (kW)} \text{ ou } Pot = \frac{10^3QHm}{75\eta} \text{ (cv)} \quad (4)$$

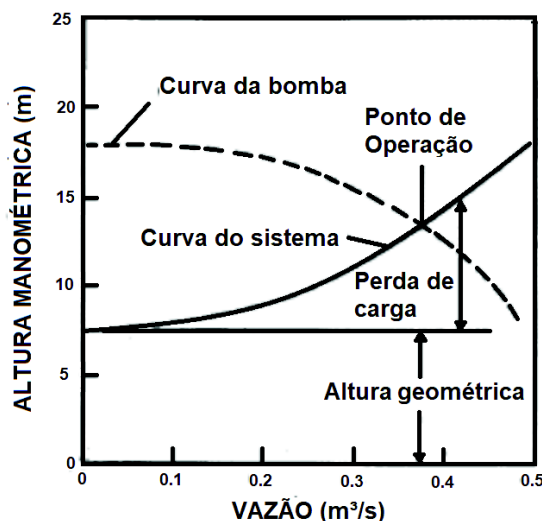
Tabela 1 – Valores de acréscimo de potência no motor para folga no sistema.

Potência da bomba	Acréscimo
até 2 hp	50%
2 a 5 hp	30%
5 a 10 hp	20%
10 a 20 hp	15%
maior que 20 hp	10%

Fonte: Adaptado de PORTO (2004)

A curva do sistema é um elemento fundamental dentro do dimensionamento do conjunto motobomba. Esta indica a relação entre vazão e altura manométrica. Essa variação se dá pelo fato de que, considerando um mesmo sistema, quanto maior a vazão, maior será a perda de carga, consequentemente, maior a altura manométrica. O ponto de encontro entre a curva do sistema e a curva da bomba é o ponto de funcionamento. Um exemplo dessas curvas é mostrado no Gráfico 3 abaixo:

Gráfico 3 – Indicação de curva do sistema e ponto de funcionamento



Fonte: Adaptado de TSUTIYA (2006)

Outro ponto importante a ser observado no dimensionamento se diz respeito à cavitação na bomba. Este fenômeno ocorre quando a pressão no interior da bomba se torna menor que a pressão de vapor, gerando bolhas de vapor, até que o fluido atravesse para uma outra região de maior pressão, onde há, por sua vez o colapso das bolhas. O processo de criação e colapso acaba danificando elementos da bomba.

Para que esse processo não ocorra, os fabricantes determinam a energia mínima disponível junto à entrada da bomba. Essa energia corresponde à diferença entre energia do líquido e a pressão de vapor para a temperatura onde o processo ocorre. A essa diferença é designado pelo termo “N.P.S.H. (NET POSITIVE SUCTION HEAD) Requerido”, ou NPSH_r. Esse valor é uma característica da bomba, que surge de acordo com sua concepção física.

O valor de energia disponível, ou “N.P.S.H. Disponível” (NPSH_d), é uma característica física da instalação, como cotas e diâmetros. O valor do NPSH_d e sua relação com o NPSH_r são dadas pela Equação 5, que mostram que quanto maior a pressão de vapor (p_v), maior a diferença de cota do conjunto elevatório em relação ao nível da água (Z) e maior a perda de carga na sucção, menor será o NPSH_d.

$$NPSH_d = \frac{p_a - p_v}{\gamma} - Z - \Delta H_s \text{ e } NPSH_d > NPSH_r \quad (5)$$

A diferença de nível entre nível de entrada da bomba e nível da água será positiva na equação, caso a bomba fique em nível inferior ao nível da água.

Caso a verificação mostre que $NPSH_d < NPSH_r$, então deverão ser realizadas alterações no sistema para que a cavitação não ocorra.

3.1.7 Outros elementos acessórios dos sistemas de distribuição.

Diversos órgãos acessórios são utilizados nos sistemas de abastecimento, em diversas de suas etapas. Alguns importantes de serem lembrados são:

- Válvula de retenção: Atua permitindo o fluxo em um único sentido, utilizada na proteção de bombas contra o golpe de aríete.
- Válvula de pé: utilizada para que a bomba não perca sua escorva (esvazie sua tubulação de sucção).
- Válvula de manobra: são válvulas utilizadas para isolamento de áreas e trechos de redes, geralmente são utilizadas em caso de acidentes e demandas de emergência.

- Redutora de pressão: válvula de controle automática que reduz a pressão a montante e mantém a pressão a jusante em uma posição constante.
- Válvula sustentadora de pressão: atua a montante, mantendo pressões mínimas, são utilizadas para manter pressões adequadas, principalmente nas redes de distribuição.
- Válvula de descarga: aquelas usadas para esvaziamento da rede, para realização de manutenção ou limpeza. Deve destinar água a um córrego ou galerias de águas pluviais.
- Ventosa: peças que permitem a entrada e saída de ar nas tubulações, nesse último caso, atuando contra variações de pressão.
- Reservatório hidropneumático: é uma câmara com água e ar comprimido, que é usado para a proteção da rede em caso de parada da bomba.
- Chaminé de equilíbrio: atua como reservatório intermediário de nível variável e são utilizadas para interceptar ondas de pressão na tubulação;
- Tanque de alimentação unidirecional: funciona de forma semelhante à chaminé de equilíbrio, entretanto, é permitido apenas o escoamento no sentido do tanque para a rede. (TSUTIYA, 2006, p. 325-330, 439-451).

3.2 TEORIA HIDRÁULICA APLICADA AOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO HUMANO

Para entender o funcionamento dos sistemas de abastecimento, importante a base teórica sobre o tema, a fim de que, todas as análises e decisões gerenciais tomadas sejam bem embasadas tecnicamente, resultando em maior confiabilidade e eficiência dos elementos do sistema.

3.2.1 Classificação dos movimentos

Segundo Azevedo Neto (1998, p. 46), as classificações hidráulicas para os escoamentos em função de suas características são diversas: laminar, turbulento, unidimensional, bidimensional, rotacional, irrotacional, permanente, variável, uniforme, variado, livre forçado, fluvial, torrencial etc. De acordo com a finalidade do trabalho, duas classificações serão abordadas: quanto ao regime e quanto às características hidráulicas.

O regime de escoamento pode ser classificado como *laminar*, quando as partículas se movem seguindo trajetórias bem definidas, ou como *turbulento*, quando apresentam trajetórias aleatórias e irregulares. O regime de escoamento depende, basicamente, da viscosidade cinemática e da velocidade média do escoamento e do diâmetro do contido pelo qual o escoamento se dá. Sua classificação é determinada pelo número de Reynolds (Re) (Equação 6):

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (6)$$

Onde o regime é laminar para $Re < 2000$ e turbulento para $Re > 4000$. Caso $2000 < Re < 4000$, se diz que o escoamento se dá em regime de transição. Nos problemas práticos de Engenharia, os regimes encontrados são os turbulentos. Portanto, para a finalidade do trabalho, que é uma aplicação de engenharia, serão encontrados casos apenas de escoamento em regime turbulento.

Em relação às características e propriedades hidráulicas, o escoamento pode ter diferentes classificações. Conforme Porto (2004, p. 4), caso as propriedades não variem com o tempo e dependam apenas da posição, o movimento do escoamento ocorre em regime *permanente*. Caso contrário o regime é *não permanente*. Dentro do regime permanente, há a subclassificação entre *uniforme*, onde a velocidade é constante ao longo de todo trecho, ou seja, a área permanece inalterada, ou *não uniforme*, quando há a alteração de velocidade (de forma a acelerar ou retardar). Um fluxograma com classificação é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma com classificação do escoamento quanto às propriedades hidráulicas.



Fonte: Adaptado de PORTO, 2004

3.2.2 Equações hidráulicas básicas

A introdução se dá pelas equações de continuidade (Equação 7) e equação da energia, pelo teorema de Bernoulli (Equação 8):

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (7)$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h \quad (8)$$

3.2.3 Perda de carga

Dentro das tubulações onde se desenvolvem escoamentos, as quedas de pressões existem pelos movimentos de fricção das moléculas entre si e com as paredes do conduto não podem ser calculadas analiticamente. Para estimar algebricamente este valor é necessário, a partir de experiências, determinar como fatores se relacionam. A prática mostra que a diferença de pressão (Δp) é causada por atrito e depende do diâmetro, D , da rugosidade do tubo e, da velocidade do escoamento, V , do comprimento, L , da viscosidade do fluido, μ , e da massa específica, ρ (ou peso específico, γ) (FOX, 2004, p.225).

Também Azevedo Neto (1998, p. 116), sobre a perda de carga contínua diz que poucos problemas merecem tanta atenção ou foram tão investigados quanto o da determinação das perdas de carga nas canalizações. As dificuldades que se apresentam ao estudo analítico da questão são tantas que levaram os pesquisadores às investigações experimentais.

As conclusões tomadas são que a perda de carga é: a) diretamente proporcional ao comprimento da tubulação; b) inversamente proporcional a uma potência do diâmetro; c) função de uma potência da velocidade média e da viscosidade cinemática; d) variável com a rugosidade dos tubos no regime turbulento; e) independentemente da posição do tubo da pressão interna sob a qual o líquido escoar. A relação é dada pela Equação 9.

$$\Delta h' = k' \times \pi D L \times \frac{1}{D^m} \times v^n \times \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^r \quad (9)$$

Reduzindo os termos constantes (Equação 10):

$$\Delta D^5 L \propto \frac{R^8}{\epsilon^9} \quad (10)$$

3.2.3.1 Fórmula Universal

Atribuindo valores a “k”, “n” e “m”, Darcy e Weisbach chegaram à fórmula universal, que pode ser considerada tecnicamente a mais correta. Na Equação 11 a perda de carga está em função da velocidade, já na equação 12, em função da vazão:

$$\Delta D^5 L \propto \frac{V^8}{\epsilon^9} \quad (11)$$

$$\Delta D^5 L \propto \frac{Q^8}{\epsilon^9} \quad (12)$$

Como citado anteriormente, os outros elementos, além dos tubos também compõe os sistemas de abastecimento, há as válvulas, derivações e curvas. Neles também ocorrem a perda de carga pontual, chamada de “Perda de carga localizada” (Equação 13). O valor é diferenciado, no sentido de aumentar a perda de pressão em comparação a um elemento retilíneo com a mesma extensão. A diferença se dá pelo fato de haver diferença no módulo ou direção da velocidade média (FOX, 2004, p.226). A perda de carga localizada pode ser estimada pela Equação 13 (AZEVEDO NETO, 1998, p. 121):

$$\Delta D L = K \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

A estimativa dessa perda de carga é realizada por métodos que podem tratar de encontrar o seu valor por uma fórmula geral, ou adicionando-se às fórmulas de perda de carga contínua comprimentos equivalentes obtidos por meio experimental. Geralmente, em sistemas de distribuição de água, as redes são longas, e as perdas de cargas pontuais representam uma parcela não significativa (PORTO, 2004, p. 79).

3.2.3.2 Determinação do coeficiente de atrito f

Diversos autores trabalharam em encontrar fórmulas analíticas para determinar o fator f (coeficiente de atrito). Para o escoamento laminar ($Re < 2000$), o fator pode ser encontrado por (Equação 14):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (14)$$

No escoamento turbulento há dependência de se conhecer a rugosidade do material e sua relação com a camada limite. Quando uma superfície é rugosa ao ponto de que os ressaltos ultrapassem a camada limite, o tubo é classificado como rugoso e a perda de carga é mais elevada (Equação 15), ao contrário disso, os ressaltos não ultrapassam a camada, o tubo é liso (Equação 16).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 + 2 \log \frac{D}{2e} \quad (15)$$

$$\frac{1}{f} = 2 \log(R_e \sqrt{f}) - 0,8 \quad (16)$$

Outras fórmulas foram desenvolvidas experimentalmente, Colebrook e White apresentaram a seguinte equação implícita para sua determinação (Equação 17).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (17)$$

É indicada para faixa de transição entre os escoamentos turbulentos lisos e rugosos e tem que atender a seguinte condição (Equação 18):

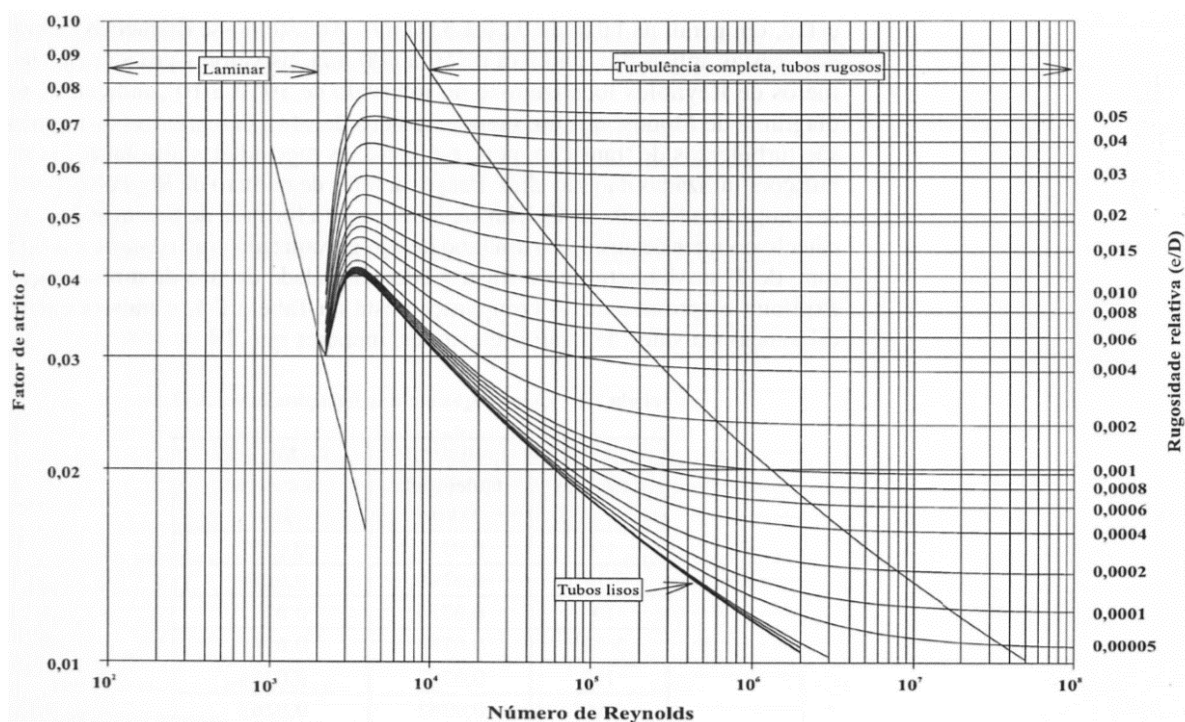
$$14,14 < \frac{Re \sqrt{f}}{D/e} < 198 \quad (18)$$

Expressões matemáticas foram desenvolvidas para f explícito (Equação 19), reduzindo assim, diversas dificuldades em relação às fórmulas implícitas, inclusive computacionais. Swamee e Jain apresentam a seguinte fórmula para f explícito e válida para $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ e $10^{-6} \leq e/D \leq 10^{-2}$ (PORTO, 2004, p. 45):

$$B L \frac{r \mathbb{E} w}{\mathbb{H} K \mathbb{Q}^A W_{1 \mathbb{E}} \& E^w \mathbb{E}^V W_{4 A^4 \mathbb{K}} = AC} \quad (19)$$

Diagramas também são utilizados para a determinação do valor do coeficiente de atrito, que são baseadas nas fórmulas teóricas. Azevedo Netto (1998, p. 169) cita os diagramas de Stanton, Rouse e Moody, sendo este último o mais difundido. O exemplo do diagrama de Moody é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de Moody com classificação do escoamento



Fonte: PORTO, 2004

O fator dependerá de características do escoamento, além de características do material. Na Tabela 2 são apresentados os valores de rugosidade de diversos materiais.

Tabela 2 – Valores das rugosidades internas de tubos em milímetros

Características da tubulação	Rugosidade		
	Mín.	Usual	Máx.
1. Tubos de aço, juntas soldadas, interior contínuo			
Grandes incrustações ou tuberculizações	2,4	7	12,2
Tuberculização geral de 1 a 3 mm	0,9	1,5	2,4
Pintura à broca, com asfalto, esmalte ou betume	0,3	0,6	0,9
Leve enferrujamento	0,15	0,2	0,3
Revestimento obtido por imersão em asfalto quente	0,06	0,1	0,15
Revestimento com argamassa de cimento obtida por centrifugação	0,05	0,1	0,15
tubo revestido de esmalte	0,01	0,06	0,3
2. Tubos de concreto			
Superfície obtida por centrifugação	0,15	0,3	0,5
Superfície interna bastante lisa, executada com formas metálicas	0,06	0,1	0,18
3. Tubos de cimento amianto		0,015	0,025
4. Tubos de ferro fundido			
Ferro galvanizado, fundido revestido	0,06	0,15	0,3
Ferro fundido, não revestido, novo	0,25	0,5	1
Ferro fundido com corrosão	1	1,5	3
Ferro fundido com depósito	1	2	4
5. Latão, cobre, chumbo	0,04	0,007	0,01
6. Tubos de plástico - PVC	0,0015	0,06	-

Fonte: Adaptado de LENCRASTE, 1996

3.2.3.3 Equação da Hazen-Willians

Algumas fórmulas empíricas foram desenvolvidas buscando a facilitação de cálculos. Dentre as mais usadas a de Hazen-Willians se destaca. A fórmula está descrita na Equação 20:

$$\Delta h' = \frac{10,64}{C^{1,85}} \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} L \quad (20)$$

De acordo com Porto (2004, p. 53), existem condições em que a equação tem o uso recomendado: escoamento turbulento de transição; água a 20° C e; válida para $D > 0,050$ m. O “C” é o coeficiente de perda de carga da fórmula de Hazen-Willians, apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de coeficiente C da fórmula de Hazen-Willians

Material	C	Material	C
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	Concreto com acabamento comum	120
Aço galvanizado	125	Ferro fundido novo	130
Aço rebitado novo	110	Ferro fundido de 15 a 20 anos de uso	100
Aço rebitado em uso	85	Ferro fundido usado	90
Aço soldado novo	130	Ferro fundido revestido de cimento	130
Aço soldado em uso	90	Latão	130
Aço soldado com revestimento especial	130	Manilha cerâmica virada	110
Chumbo	130	Plástico	140
Cimento amianto	140	Tijolos bem executados	100
Cobre	130	Vidro	140

Fonte: Adaptado de AZEVEDO NETTO, 1988

3.2.3.4 Orifícios em descarga livre

Orifícios são perfurações ou aberturas de perímetro fechado, com geometria definida, realizada na parede de um reservatório ou canal. Por esse orifício escoar a água. Suas classificações são em relação a forma (circular, retangular, triangular, etc.), orientação do plano do orifício em relação à superfície do líquido (verticais, horizontais ou inclinados), tamanho (pequeno e grande) e espessura da parede (delgada ou espessa). O orifício é de parede fina quando sua espessura se encontra em um intervalo, em relação ao diâmetro de $0,5d < e < 1,5d$, e sua descarga é dada pela Equação 21 (PORTO, 2004, p. 352 – 354):

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (21)$$

Para o esvaziamento parcial, Porto (2004, p. 404) explica que multiplicando os termos por um tempo, encontra-se a variação de volume (Equação 22):

$$V = (Cd A \sqrt{2gH}) t \quad (22)$$

O volume pode ser expresso pelo produto da área (S) pela variação infinitesimal da carga hidráulica (dH) (Equação 23). Para uma variação infinitesimal do tempo, há uma variação infinitesimal da altura H. O desenvolvimento para encontrar uma fórmula para o tempo em função dos níveis inicial e final é mostrada abaixo (Equação 24 e Equação 25):

$$-SdH = (Cd A \sqrt{2gH})dt \quad (23)$$

$$\int_0^t dt = - \int_{H_1}^{H_2} \frac{S dH}{Cd A \sqrt{2gH}} \quad (24)$$

$$\int_0^t dt = - \int_{H_1}^{H_2} \frac{S dH}{Cd A \sqrt{2g} H^{1/2}} \Rightarrow t = \frac{2 S}{Cd A \sqrt{2g}} (H_1^{1/2} - H_2^{1/2}) \quad (25)$$

3.2.3.5 Fórmula de Chézy-Manning para condutos livres, circulares e totalmente cheios

Condutos livres são aqueles que possuem em pelo menos um ponto de escoamento no qual está sujeito à pressão atmosférica (AZEVEDO NETTO, 1998, p. 361). Esses condutos são também conhecidos como canais e, em 1775, Chézy desenvolveu uma fórmula para representar a velocidade nestes (Eq 26):

$$v = C\sqrt{R_H I} \text{ e } Q = A C\sqrt{R_H I} \quad (26)$$

Esta é uma fórmula fundamental e serviu como base para o desenvolvimento de outras fórmulas práticas. Em 1890, Manning fez uma associação entre o coeficiente de rugosidade C de Chézy, o raio hidráulico e o coeficiente de rugosidade de Manning (Equação 27):

$$C = \frac{R_H^{1/6}}{n} \quad (27)$$

Na seção plena circular $R_H = \frac{D}{4}$, substituindo esses termos na fórmula de Chézy, se tem que (Equação 28):

$$v = \frac{S}{J} \frac{r}{A} \{ \frac{6}{7} \frac{f}{h} \}^5 \quad A = 3 \frac{S}{J} \frac{r}{A} \{ \frac{6}{7} \frac{f}{h} \}^5 \quad (28)$$

3.3 PROCESSOS NUMÉRICOS AUXILIADOS POR COMPUTADORES APLICADOS AO ABASTECIMENTO DE ÁGUA

3.3.1 Softwares Utilizados

A atividade de dimensionamento de redes de distribuição pode se tornar algo que exija empenho, dependendo das dimensões do projeto tratado. O uso da tecnologia como ferramenta de busca de melhor eficiência e eficácia na prestação de serviços é fundamental. Do ponto de vista gerencial, a atuação da computação nas resoluções de problemas modelados matematicamente gera rapidez e, conseqüentemente, economia de tempo. As decisões de gestores devem ser cada vez mais embasadas tecnicamente, sem que se demande muito tempo a mais para que as respostas necessárias apareçam.

Do ponto de vista técnico, os benefícios também são inúmeros. Um dos principais, imprescindível de ser citado, é que as simulações passam a ser possíveis antes da execução física dos sistemas. Permitindo a identificação de erros que, apenas em projeto, fossem difíceis de se visualizar. trazidos por esse tipo de tecnologia citado, é que as simulações permitem (GAIO; HELLER, 2010, p. 751-753).

Estão disponíveis no mercado, ou de forma gratuita, diferentes softwares aplicados aos sistemas de abastecimento. Alguns dos principais são:

- REMDEM: Permite pelo método de Hardy Cross o dimensionamento ou averiguação de uma rede de distribuição de água que funciona por gravidade. O limite é de até 100 trechos com um ou mais reservatórios de alimentação. (PORTO,)
- RAWin, Water CAD e SANCAD: Software profissionais, permitem dimensionamento e verificação de desenhos realizados nos próprios softwares. Possuem aplicações com fórmulas de perda de carga, entradas de dados em arquivos DXF e DWG, entre outros. (GAIO; HELLER, 2010, p. 778)
- Sistema UFC: um conjunto de softwares em diferentes tipos de linguagem, com aplicações diversas. Composto pelos UFC 2 a UFC, UFC 8 e UFC 9, que somados, abrangem diversas funcionalidades, como desenhos e

dimensionamentos hidráulicos, determinação de diâmetros, seleção de bombas, simulação computacional do Golpe de Aríete em linhas de recalque, tudo isso para redes de água e esgoto. (LAHC, 2018)

Existem também outras inúmeras planilhas que podem ser facilmente utilizadas no Microsoft Excel, ou também no Calc LibreOffice, além de softwares criados em laboratórios de engenharia e hidráulica.

3.3.2 EPANET

O Software EPANET foi criado e distribuído pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA), que é a agência do estado norte-americano destinada a proteger os recursos naturais. Os seus objetivos e funções estão voltadas a desenvolvimento de ações que tragam a prevenção e controle de poluição do ar, proteção da qualidade da água e aquíferos subterrâneos, por exemplo, a partir da implementação de tecnologias ambientais inovadores e viáveis economicamente. (ROSSMAN, 2000).

Segundo E. Timothy Oppelt, diretor do National Risk Management Research Laboratory, o EPANET foi criado para satisfazer requisitos regulamentares e as necessidades dos consumidores e entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água quanto às informações dos movimentos e transformações de água destinada ao consumo humano dentro dos sistemas de distribuição. Essas necessidades surgem a partir das tomadas de decisão para gestão dos recursos, tanto financeiros, quanto naturais, implementação de regulações e todas qualquer outro caso que também se refira à atividade de distribuição de água.

O trabalho hidráulico é caracterizado pela conservação da energia, pela continuidade e relação entre vazão e perda de carga. Para resolvê-las o EPANET realiza iterações por meio do “Método do Gradiente” desenvolvido por Pilati *et al* (1987) apud ROSSMAN, (2000), que busca a condição de equilíbrio. As iterações possuem uma sequência bem estabelecida dentro do algoritmo do programa. São vários passos dados até que haja convergência para as equações de continuidade e perda de carga, de acordo com a equação de perda de carga escolhida.

3.3.2.1 Exemplos de trabalhos apresentados utilizando o EPANET

O EPANET é um software já consolidado na área da engenharia sanitária e ambiental. Como possui esse uso que abrange muitos profissionais, diversos pesquisadores já atuaram utilizando suas ferramentas, a fim de promover um melhor

entendimento sobre o tema. Alguns exemplos de trabalhos realizados com o EPANET são:

- Redução de vazamentos via válvulas redutoras de pressão (VRPS) (REIS *et al*, 2006);
- Dimensionamento econômico de redes de abastecimento de água utilizando o EPANET e a linguagem Delphi (COSTA, 2006);
- Estudo de caso do sistema de abastecimento e distribuição de água da cidade de Viçosa-MG (MARTINS, 2016);

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para um bom entendimento do procedimento utilizado com as ferramentas do Software EPANET foram realizadas algumas aplicações, para melhor compreender a construção e análise de diferentes tipos de casos. Fez-se o detalhamento desses procedimentos e aplicações de forma gradual. Dessa forma a modelagem foi realizada em quatro simulações, onde: duas usaram a base teórica com o escoamento de orifício em descarga livre e o funcionamento de redes em escoamento livre, e as outras duas simularam projetos reais de sistemas de recalque.

Nas duas primeiras modelagens, de descarga livre e escoamento livre, busca-se mostrar o conhecimento das ferramentas disponíveis para permitir seu manejo, criação e adaptação que dependem das necessidades do usuário em hidráulica básica. Já nas duas últimas modelagens foram simulados sistemas de recalque que abrangem um número significativo de funções fundamentais. Uma vez compreendidas, essas funções poderão ser utilizadas em diversos tipos de problemas e diferentes tipos de aplicações.

4.1.1 APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO EM ORIFÍCIO DE DESCARGA LIVRE

Na terceira foi simulado o escoamento em orifício com descarga livre e escoamento livre na tubulação com a equação prática de Manning.

No software EPANET foi representado um nó sob carga hidráulica de um reservatório, ligado por meio de uma tubulação com um metro de comprimento, uma rugosidade de 150 (na utilização da fórmula de Hazen Willians) e um diâmetro de 10.000m. Essa dimensão é um artifício para que a perda de carga se torne desprezível, uma vez que é inversamente proporcional à uma potência do diâmetro da tubulação. Assim, a pressão que atuará no ponto será apenas a da carga hidráulica do reservatório ao qual está ligado.

Foi calculada a vazão teórica para um orifício de pequena dimensão de 10 cm e carga hidráulica de 6m e em seguida foi realizada a composição do esquema no software e realizada a simulação para verificar se os resultados eram compatíveis.

Também foi analisado o tempo de esvaziamento do reservatório por meio desse mesmo orifício. No software foi realizada uma simulação dinâmica, com o tempo total de 60 horas. Quando o reservatório esvazia, o programa lança o alerta indicando a que horas o esvaziamento ocorreu. Para avaliar a o erro que ocorre devido os processos numéricos foram realizadas simulações considerando um orifício de 10cm de diâmetro e variando o volume e diâmetro de um a 20 metros, ambos. Foram calculadas também, para cada caso, o valor teórico do tempo de escoamento. Os erros relativos foram calculados e montada uma tabela para posterior análise.

4.2 APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO LIVRE EM CONDUITO À SEÇÃO PLENA

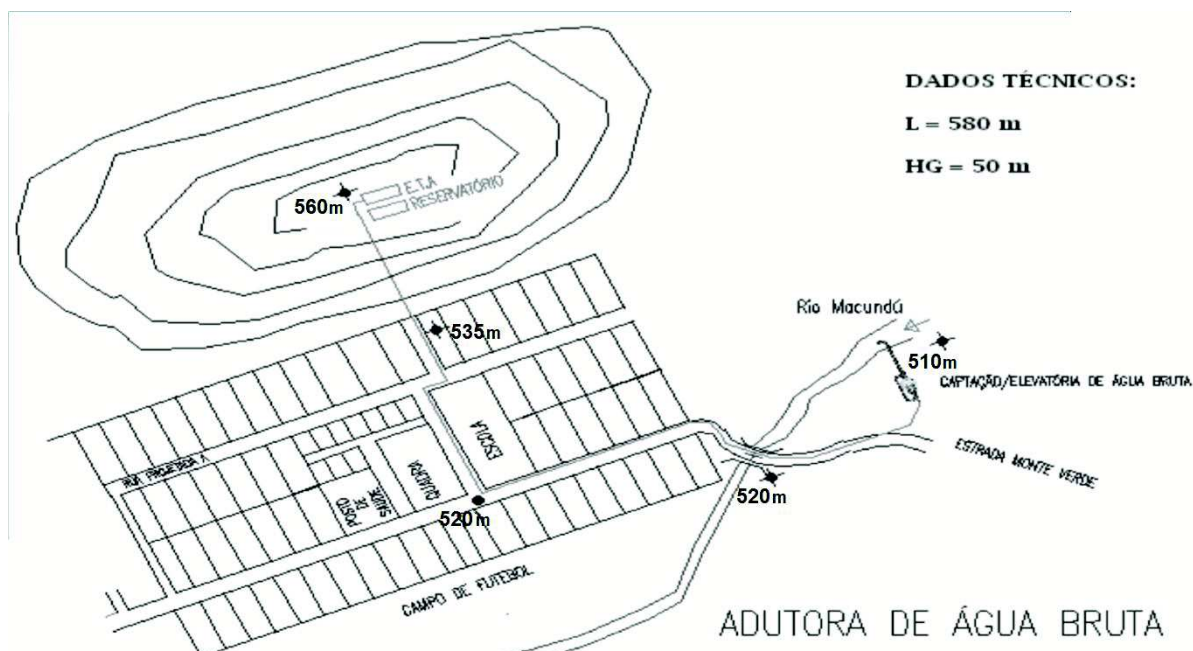
A segunda simulação verificou o escoamento livre em conduto circular à seção plena a partir da escolha, dentro do EPANET, a fórmula de Chézy-Manning para o cálculo da perda de carga. Foi montado, para análise da vazão, um sistema simples com uma tubulação de 200m de comprimento e 200mm de diâmetro ligada a dois reservatórios de níveis fixos, com diferença de cota de 20m entre os dois ($I=0,1m$). A rugosidade utilizada é de $n=0,011$.

Também foram realizadas duas simulações de problemas hidráulicamente determinados, com dois e quatro trechos diferentes, para identificar suas as inclinações. Os dados utilizados foram dois trechos de 100mm e 150mm de diâmetro, ambos com extensão de 100m, entre dois reservatórios com desnível de 30m. Já o caso com quatro trechos diferentes, foi utilizado tubos de 200, 250 e 300 mm, com 100 m de comprimento, ligando dois pontos com 20 m de diferença de cota.

4.3 SIMULAÇÃO DE VERIFICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE RECALQUE EM MACUNDÚ

Na terceira simulação foi realizada a comparação entre os processos de escolha da bomba. Se refere a um sistema de recalque da comunidade de Macundú, distrito de São João Marcos, município de Rio Claro-RJ, dimensionado por Justino e Nogueira (2012). Consideraram um consumo diário de 144.000 L/dia, sendo desses 124.000 L/dia para consumo humano e 20.000 L/dia para manutenção da ETA. As cotas dos elementos que participam do sistema são representadas na Figura 10.

Figura 10 – Esboço de levantamento topográfico da comunidade de Macundú-RJ



Fonte: Adaptado de JUSTINO (2012)

O diâmetro de 60 mm da tubulação de recalque foi encontrado a partir da fórmula da ABNT (NBR-5626), pela Equação 29:

$$D = 1,3 \sqrt[4]{\frac{T}{24}} \sqrt{Q} \quad (29)$$

Para descobrir a altura manométrica, os autores somaram a altura geométrica ao valor da perda de carga. O valor desta foi determinado utilizando a fórmula universal, com o coeficiente “f” encontrado por meio de uma fórmula explícita, a Equação 30:

$$f = 0,0055 \left[1 + \left(20000 \frac{\varepsilon}{D_r} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] \quad (30)$$

As perdas de carga localizadas foram consideradas a partir do método dos comprimentos equivalentes. Os valores de rugosidade e comprimento, para sucção e recalque, estão todos localizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados utilizados na tubulação de recalque sucção

Diâmetro da tubulação de recalque: D=60,00 (mm) ou 0,06 (m)			Rugosidade da tubulação de PVC: e = 0,001 (mm)	
Comprimento real da tubulação de recalque: Tr = 580,00 (m)			Cota do reservatório elevado: 60 m	
Item	Elemento (acessórios)	Qtde	Comprimento Equivalente Unitário (m)	Comprimento Equivalente Total (m)
01	Joelho de 90°	01	3,40	3,40
02	Curva de 90°	08	1,30	10,40
03	Curva de 45°	03	0,70	2,10
04	Tê de passagem direta	01	2,30	2,30
05	Tê de passagem lateral	01	7,60	7,60
06	Registro de gaveta	01	0,80	0,80
07	Saída de canalização	01	3,30	3,30
08	Válvula de retenção horizontal	01	7,10	7,10
09	Ampliação concêntrica	01	-	-
Total =				37,00m
Ltr = 580,00m +37,00m = 617 m				

Diâmetro da tubulação de sucção: D=75,00 (mm) ou 0,075 (m)			Rugosidade da tubulação de PVC: e = 0,001 (mm)	
Comprimento real da tubulação de sucção Ts = 6,00 (m)			Cota do rio: 10m Cota do conjunto elevatório: 13,60m	
Item	Elemento (acessórios)	Qtde	Comprimento Equivalente Unitário (m)	Comprimento Equivalente Total (m)
01	Válvula de pé com crivo	01	25,00	25,00
02	Curva de 90°	01	1,40	1,40
03	Registro de gaveta	01	0,90	0,90
04	Tê com passagem direta	01	2,40	2,40
05	Redução excêntrica	01	-	-
Total =				29,70m
Lts = 6,00m + 29,70m = 35,70 m				

Fonte: Adaptado de JUSTINO (2012)

Utilizando na fórmula universal da perda de carga os valores de comprimentos totais, diâmetros e vazão estipulada, junto com o fator f que foi descoberto com fórmula explícita, os valores de altura manométrica dados foram:

Recalque: 46,40m (altura geométrica) + 30, 27m (perda de carga) = 76,67 m;

Sucção: 3,60m (altura geométrica) + 0,59m (altura manométrica) = 4,19 m;

Altura manométrica total: 80,86 m.

A potência da bomba foi escolhida de forma a atender os parâmetros de altura manométrica, vazão e NPSH requerido. A altura manométrica e a vazão determinaram

a potência pela Equação 4, mais o acréscimo da margem de segurança encontrada na Tabela 1.

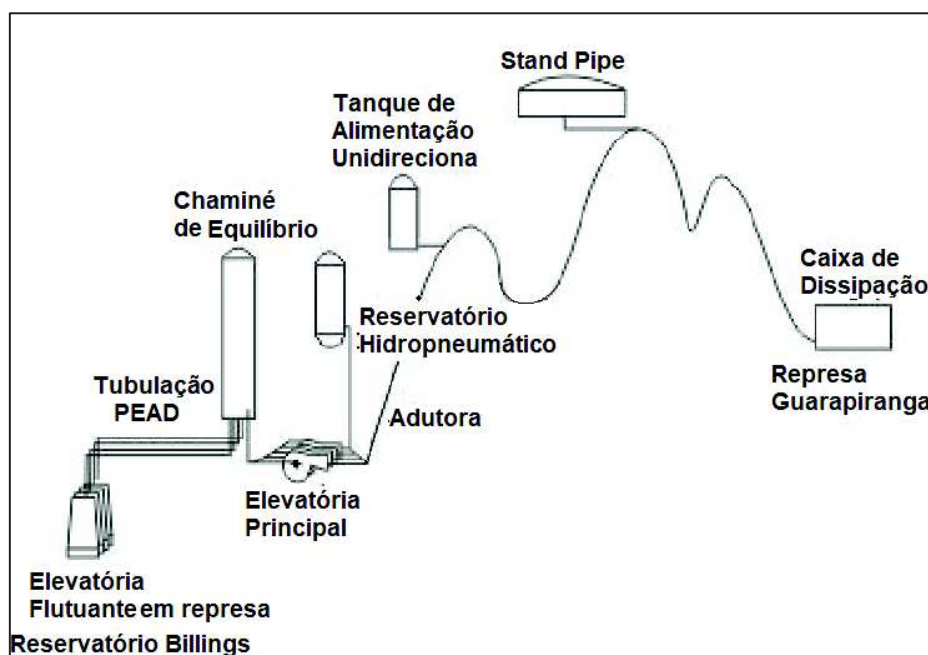
Para a simulação, deve ser escolhida a fórmula que determinará a perda de carga. Foi escolhida a fórmula de Hazen-Williams para determinar a perda de carga.

Para fazer a simulação, nesse caso, foi necessário inserir no programa os elementos físicos que compõe o sistema: elemento que representa a captação, o conjunto moto-bomba que representa a elevatória e o reservatório elevado. Além disso, fornecer o mínimo de informações, que são seus dados topográficos, propriedades da tubulação, volumes de reservatórios e curvas das bombas.

4.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA TAQUACETUBA DE TRANSFERÊNCIA DE VOLUMES

A última modelagem é do Sistema Taquacetuba para transferência de volumes de água, da ordem de 4 m³/s, do reservatório Billings para represa Guarapiranga – Região metropolitana de São Paulo. O trabalho foi realizado por Shiromoto et al. (2005), onde descrevem o sistema, fornecem informações suficientes para a realização da simulação, fazendo com que possa ser realizada uma tentativa adequada de mostrar seu funcionamento e fazer análises. O sistema funciona de acordo com a Figura 11.

Figura 11 – Esquema do Sistema de Adução Taquacetuba



Fonte: Adaptado de SHIROMOTO (2005)

As características necessárias para a simulação do sistema, que estão disponíveis no trabalho realizado, são:

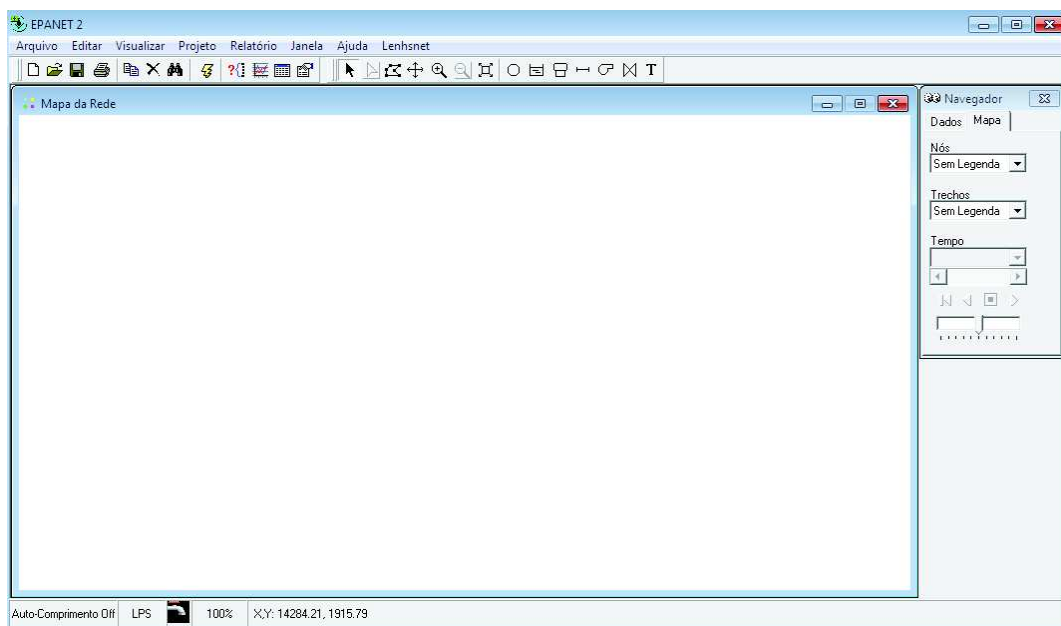
- Nível do fundo no local da captação flutuante: 737,00 m;
- Nível da estação elevatória de água bruta: 749,00 m;
- Nível d'água no Stand Pipe: 823,00 m;
- Nível d'água na Caixa de Dissipação: 746,00 m;
- Captação em elevatória flutuante com 4 conjuntos motobomba em paralelo;
- Vazão nominal de 1,0 m³/s e altura manométrica de 20 mca para as bombas da elevatória flutuante;
- Estação elevatória com 4 conjuntos motobomba em paralelo;
- Vazão nominal de 1,0m³/s e altura manométrica de 83,3 mca para as bombas da elevatória;
- Stand Pipe: Diâmetro de 22,6 m, nível máximo de 6 m;
- Chaminé de equilíbrio: Diâmetro de 5,0 m, altura de 16 m.
- Adutora com diâmetro de 1500mm entre Elevatória e Stand-Pipe: 5.530 m;
- Adutora com diâmetro de 1500mm após Stand-Pipe: 2.568 m;
- Adutora com diâmetro de 1200mm após fim de adutora de 1.500 mm até final da linha: 5.691 m.

Como o Software EPANET não simula situações transientes, a aplicação se dá para o regime permanente com os condutos forçados. Se torna dispensável a adição dos equipamentos de proteção, que são o Tanque de Amortecimento Unidirecional e o Reservatório Hidropneumático. Após colocar os elementos, a simulação pode ser realizada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A interface de apresentação do EPANET é simples, conforme Figura 12. Não existem muitos elementos em sua página inicial, porém, suas simulações permitem uma análise segura do funcionamento de elementos, que, se fossem feitos manualmente despenderiam muito tempo.

Figura 12 – Aparência inicial do software EPANET



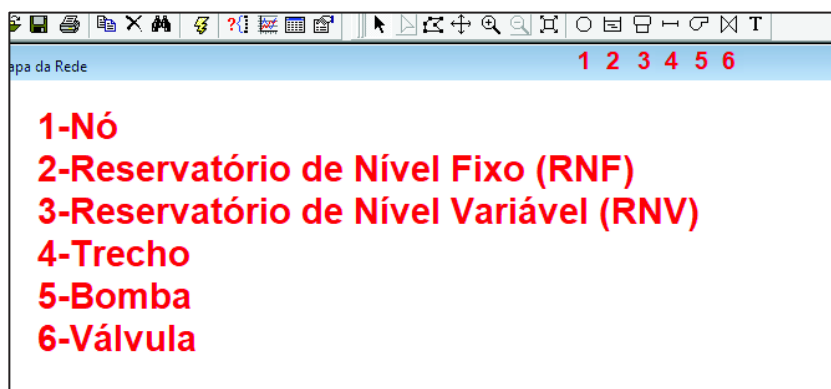
Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

Antes de se iniciar a execução ou verificação de um projeto, é importante rever alguns elementos básicos do programa no que se diz respeito ao arquivo e edição básica.

Alguns comandos são básicos e comuns (salvar, editar, copiar, etc.), portanto, de conhecimento comum, sem necessidade de aprofundamento.

Para iniciar um projeto, é necessário entender os elementos disponíveis e como estes podem representar a realidade do espaço físico dentro do programa. Na Figura 13 estão destacadas e enumeradas as ferramentas.

Figura 13 – Elementos físicos



Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

O nó, dentro do EPANET, pode representar locais onde há derivações, ou mudança de tipo de material ou união de elementos com características diferentes (diâmetro, rugosidade). Duas características precisam ser atribuídas dentro do programa para que consiga modelar bem uma situação real. A primeira é a cota do terreno, e a segunda o consumo base, que representa o consumo das ligações prediais.

O reservatório de nível fixo (RNF) representa qualquer superfície líquida de um elemento natural que possui uma área considerável, onde o nível não vai variar com o aumento ou decréscimo do volume transportado pelos tubos, como por exemplo os reservatórios de barragens e rios. Também pode representar algum elemento em que se garante a manutenção do nível, como grandes reservatórios em uma Estação de Tratamento (ETA).

Reservatório de nível variável (RNV) é o elemento que representa os reservatórios que geralmente participam de redes de distribuição. Possuem uma interação maior com a distribuição e o abastecimento, no sentido de que seu volume varia, tendo valores mínimos e máximos, além da pressão que fornece à rede a que está ligado.

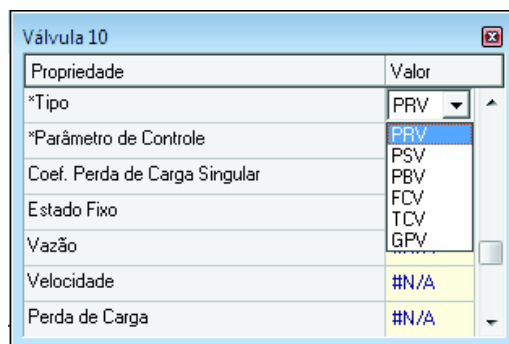
Os trechos podem representar qualquer tubulação, onde as características podem ser definidas no próprio programa. Portanto, desde redes de distribuição, até as adutoras são representadas por trechos.

Os sistemas devem ser projetados de forma a utilizar o máximo a ação gravitacional. Entretanto, é comum haver a necessidade do uso de bombas, tanto na captação, adução, como na distribuição.

Por fim, como último instrumento do programa, a válvula. Na verdade, esta ferramenta apresenta seis variações, conforme mostra Figura 14, sendo que estas significam:

1. Válvulas Redutoras de Pressão (PRV): determinam um limite superior de pressão no ponto que se encontra na rede;
2. Válvula Sustentadora de pressão (PSV): determina um limite inferior de pressão no ponto que se encontra na rede;
3. Válvulas de Perda de Carga Fixa (PBV): como o nome já diz, determina um valor de perda de carga para o ponto que está instalado na rede. Pode representar algum elemento específico que tenha uma perda de carga significativa conhecida;
4. Válvulas reguladores de Vazão (FCV):
5. Válvulas de Borboleta (TCV):
6. Válvulas Genéricas (GPV):

Figura 14 – Lista suspensa para escolha do tipo de válvula



Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

5.1 APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO EM ORIFÍCIO DE DESCARGA LIVRE

A vazão calculada para um orifício de diâmetro de pequena dimensão de diâmetro de 10 cm e carga hidráulica de 6m é dada por:

$$Q = 0,610 \pi 0,05^2 \sqrt{2g} \sqrt{6} \Rightarrow Q = 51,98 \text{ L/s}$$

onde Cd utilizado é o valor médio de 0,610.

No software, a montagem do esquema se dá com a utilização de um reservatório, cujo nível da água é 6 m, um trecho com um metro de comprimento, uma rugosidade de 150 (na utilização da fórmula de Hazen Willians) e um diâmetro de

Figura 16 – Resultado para pressão negativa

```

*****
*                               E P A N E T                               *
*  Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento  *
*      Simulação de Redes de Distribuição                          *
*  Versão 2.0 - Português (Brasil) - Build(2.00.12)                *
*****

Simulação iniciada Sat Mar 13 09:33:27 2017

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 9:33:00 horas.

```

Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

A Tabela 5 foi montada onde cada porcentagem representa, para reservatórios de diferentes diâmetros e níveis iniciais, o erro relativo do valor obtido a partir da simulação no software em relação ao valor teórico.

É plausível dizer que para níveis iniciais menores ou diâmetros menores, o erro apresentado é maior. Isso demonstra que o método numérico utilizado pelo EPANET para resolução desse caso não apresenta uma alta precisão para a resolução de escoamentos que variem rapidamente o nível (menor diâmetro) e para esvaziamentos em pouco tempo (baixo nível inicial). Entretanto, para escoamentos com características opostas os erros se mostraram dentro de uma faixa satisfatória, chegando a valores menor de 1%. Além disso, a utilização para casos onde existam outros sistemas ligados ao mesmo reservatório ou canal que forneça carga para o escoamento no orifício também se apresenta como vantajosa.

Tabela 5 – Tabela com erros relativos

		Altura do nível inicial (m)							
		1	2	3	4	5	10	15	20
Diâmetro do reservatório Circular (m)	1	629,53%	874,39%	648,79%	1034,82%	733,76%	53,80%	16,28%	8,75%
	2	25,02%	20,71%	19,08%	7,29%	14,81%	9,43%	0,59%	9,22%
	3	14,74%	10,20%	9,95%	9,56%	8,37%	6,53%	4,66%	4,94%
	4	8,30%	3,28%	6,84%	3,11%	5,37%	4,20%	3,53%	3,01%
	5	7,16%	2,90%	4,72%	4,35%	5,75%	2,87%	2,40%	2,21%
	10	2,32%	1,74%	1,47%	1,30%	1,19%	0,89%	0,76%	0,68%
	15	1,23%	0,92%	3,17%	0,68%	0,59%	0,45%	0,38%	0,27%
	20	0,78%	0,57%	0,48%	0,43%	0,31%	0,29%	0,22%	0,64%

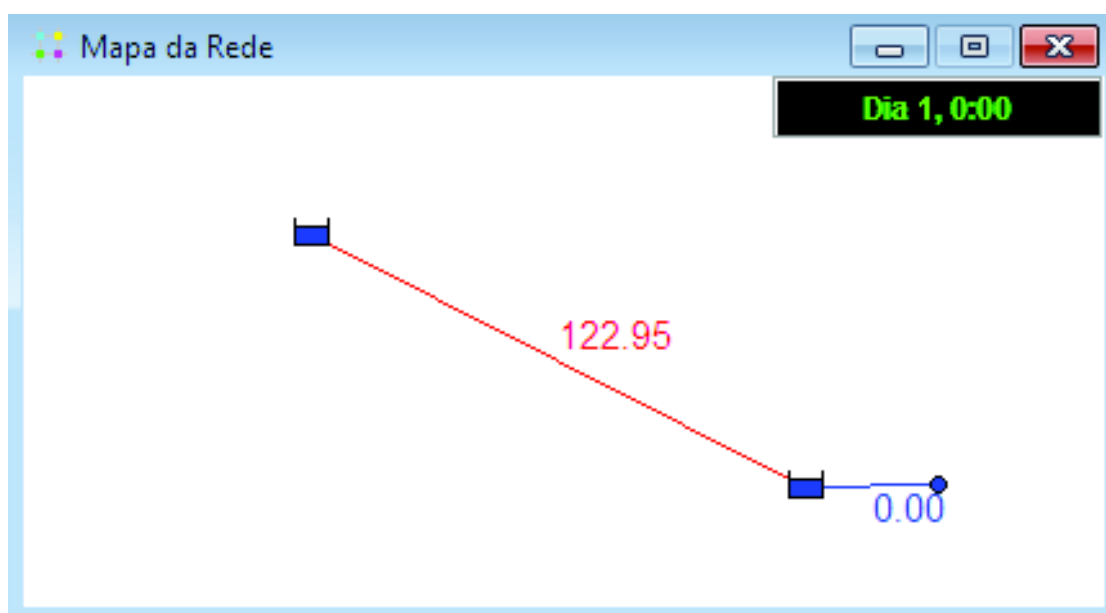
Fonte: Autoria própria

As simulações envolvendo escoamento em orifício de parede delgada se mostraram adequadas para situações estáticas, porém com erros para situações dinâmicas. Mesmo assim o software pode ser utilizado para situações mais complexas, onde existam outros sistemas ligados ao mesmo reservatório ou canal que forneça carga para o escoamento no orifício.

5.2 APLICAÇÃO EM TEORIA DE ESCOAMENTO LIVRE EM CONDUTO À SEÇÃO PLENA

O esquema para o funcionamento em escoamento livre à seção plena foi montado e não funcionou em primeiro momento. O EPANET exigiu a presença de pelo menos um nó no esquema. Ao adicionar um nó qualquer ligado a um dos RNF, a simulação ocorreu de forma bem-sucedida, com resultados mostrados na Figura 17.

Figura 17 – Vazão utilizando fórmula para escoamento livre



Fonte: Autoria própria

O cálculo da vazão mostra um resultado de:

$$Q = \frac{1}{0,011} 0,3120 (0,2)^{8/3} \cdot 0,1^{1/2} = 0,1227 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 122,7 \text{ L/s}$$

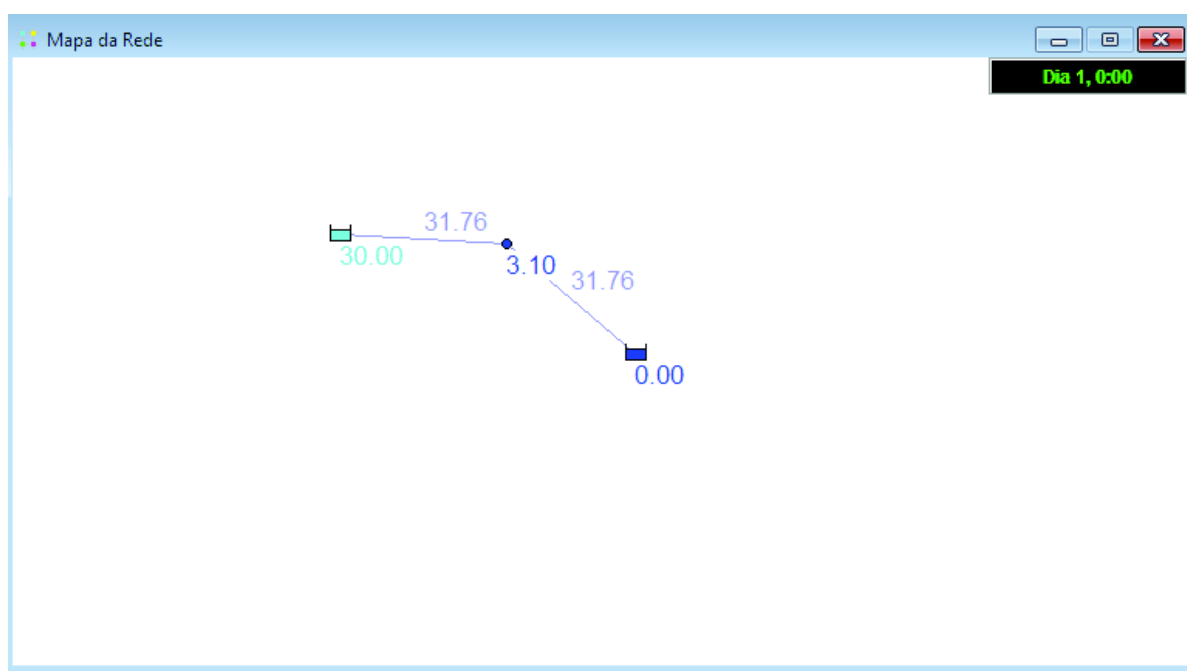
No software, o resultado mostrado é de 122,95l/s, com erro relativo de 0,2%. Tal diferença se deu por causa da constante que, na literatura pesquisada, é de 0,312, enquanto o software utiliza 0,3117. Mesmo assim os resultados podem ser conferidos e comparados com mais facilidade dentro do programa.

Para primeiro problema hidráulicamente determinado, as respostas dadas algebricamente são:

$$I_1 = \frac{30 \text{ m}}{\left(\frac{0,1^{5,33}}{0,15^{5,33}} 100 \text{ m} + 100 \text{ m}\right)} = 0,269 \text{ e } I_2 = \frac{30 \text{ m}}{\left(\frac{0,15^{5,33}}{0,1^{5,33}} 100 \text{ m} + 100 \text{ m}\right)} = 0,031$$

A resposta dada pelo EPANET é obtida quando se exibe nos nós a carga hidráulica, que representa, no caso do escoamento livre, a altura do tubo. Na Figura 18 indica que a cota onde há união dos diferentes tubos é 3,1m. Portanto, as inclinações para o primeiro e segundo trecho são, respectivamente, $26,9 \text{ m} / 100 \text{ m} = 0,269$ e $3,1 \text{ m} / 100 \text{ m} = 0,031$.

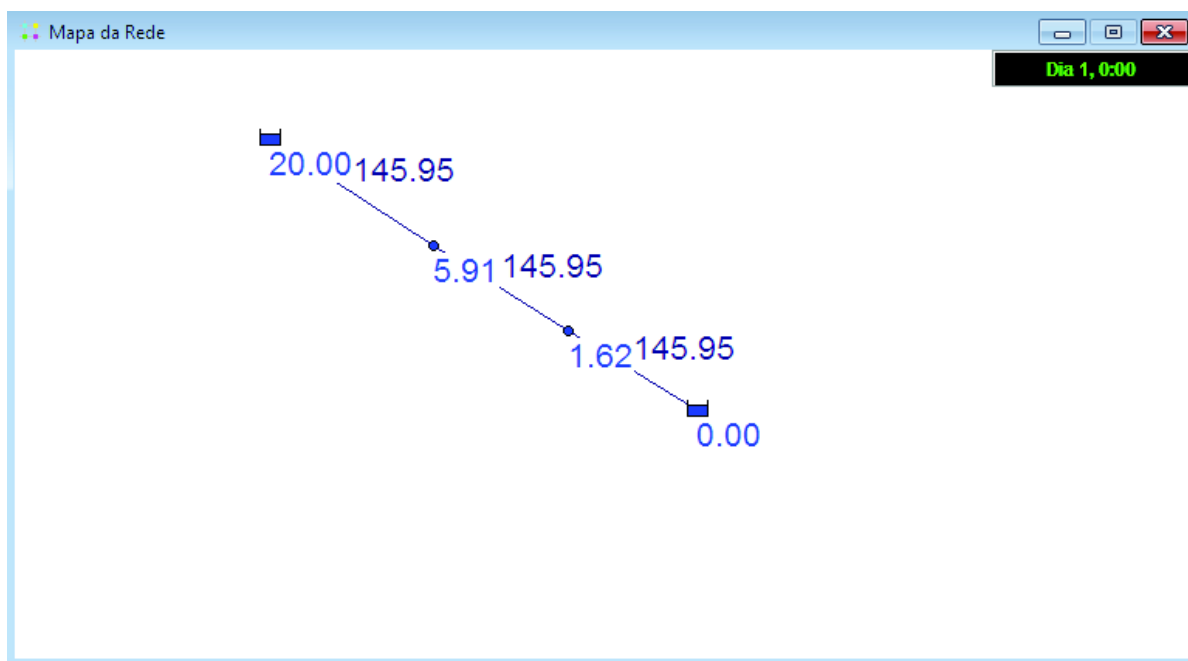
Figura 18 – Resultado para problema hidráulicamente determinado



Fonte: Autoria própria

Para a segunda situação, fica clara a vantagem do EPANET, ao resolver um problema que, se resolvido analiticamente poderia ser trabalhoso, e que no software, entretanto, torna necessário apenas à montagem do esquema. Abaixo, na Figura 19, o resultado para a rede com três trechos de diferentes diâmetros, onde o valor de carga no nó é numericamente igual à cota necessária para que as vazões, de 145,95 L/s, sejam iguais. As cotas são 5,91m e 1,62m.

Figura 19 – Resultado para problema com três trechos de diferentes diâmetros.



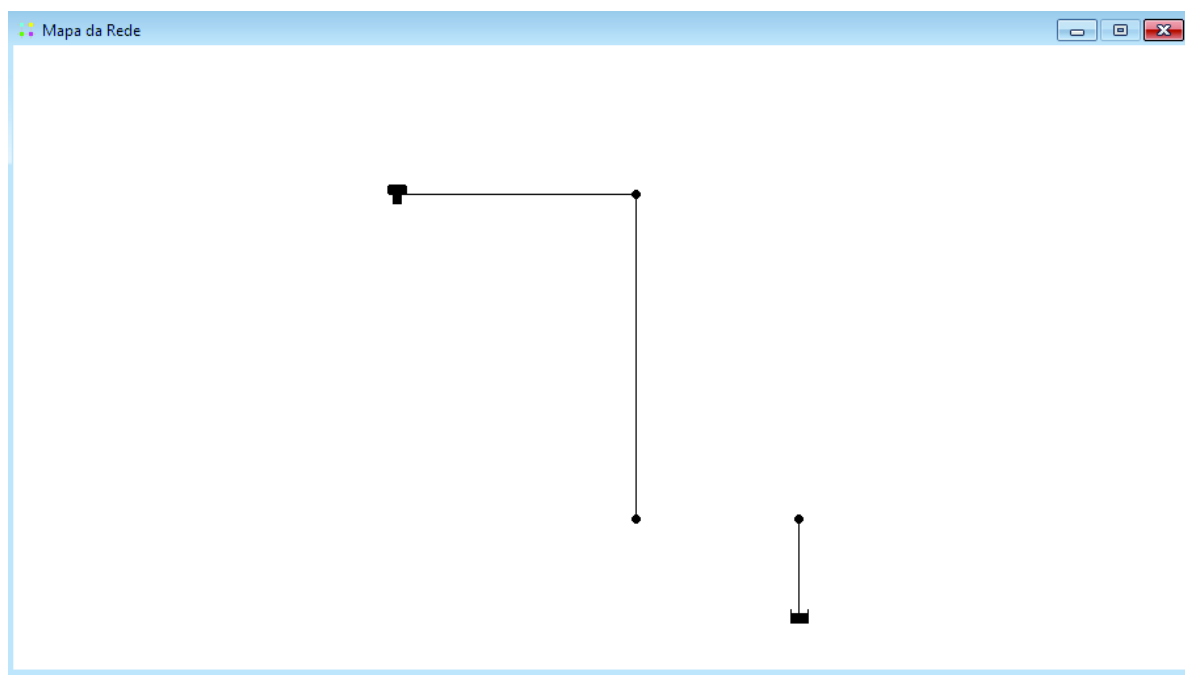
Fonte: Autoria própria

Para escoamento livre em conduto circular à seção plena o cálculo de vazão apresentou-se adequado, assim também como nos problemas hidráulicamente determinados, onde apresentaram grande vantagem para problemas com muitas incógnitas.

5.3 SIMULAÇÃO DE VERIFICAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE RECALQUE EM MACUNDÚ

Ao adicionar os pontos, suas propriedades devem ser bem definidas dentro do programa para que a realidade possa ser representada de forma adequada. O rio de onde será feito a captação pode ser bem representado por um RNF por não ter alterações significativas de seu nível. Os nós são pontos de derivações que podem ter suas cotas determinadas, e, por fim, os trechos de tubulação, interligando esses pontos, conforme Figura 20.

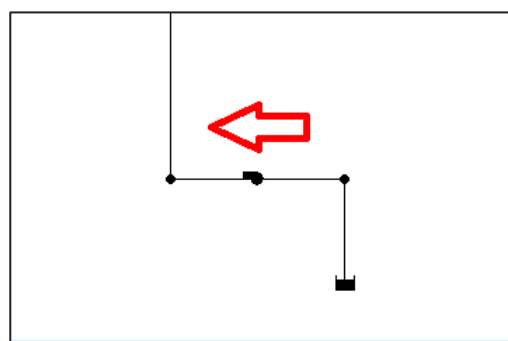
Figura 20 – Primeiros pontos e trechos



Fonte: Autoria própria

É importante atentar ao sentido da bomba, que é indicado pelo próprio formato desta Figura 16. Em um sistema com várias bombas, pode ser que, após um erro no desenho, este fique despercebido, mesmo após a realização de uma simulação, o que vai gerar uma simulação diferente da realidade.

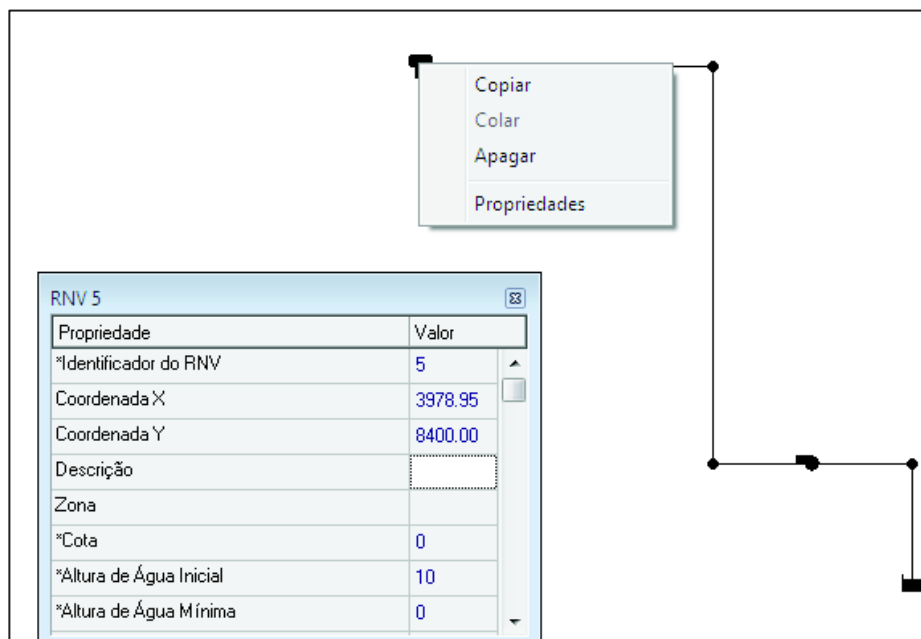
Figura 21 – Detalhe de indicação do sentido da bomba



Fonte: Autoria própria

Os dados específicos de cada ponto e trecho devem ser adicionados, conforme o que foi coletado em campo, ou dimensionado. Clicando com o botão direito e, em seguida, em propriedades, uma caixa de diálogo permite acrescentar todos os dados necessários, segundo tabelas abaixo. A Figura 22 mostra a aparência da caixa de diálogo.

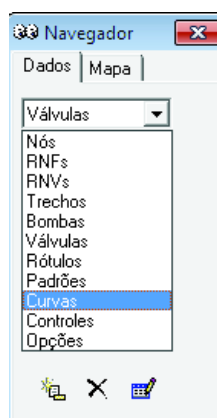
Figura 22 – Caixa de diálogo onde são indicadas as propriedades



Fonte: Autoria própria

Até então, foi realizada apenas a caracterização do sistema, sem utilizar nenhuma ferramenta disponível para ajudar no dimensionamento. O auxílio pode ocorrer na fase de escolha do conjunto motobomba. Como a potência mínima do motor já foi definida no trabalho de Justino (2012), o primeiro passo, nesse caso, é colocar no Software EPANET as curvas características de carga hidráulica e vazão das bombas. O software cria as curvas a partir de pontos ordenados que são fornecidos pelo usuário. Para inseri-los basta ir na página de Dados da janela Navegador, selecione Curvas (Figura 23) a partir da lista suspensa e clicar no botão de Adicionar.

Figura 23 – Página de dados

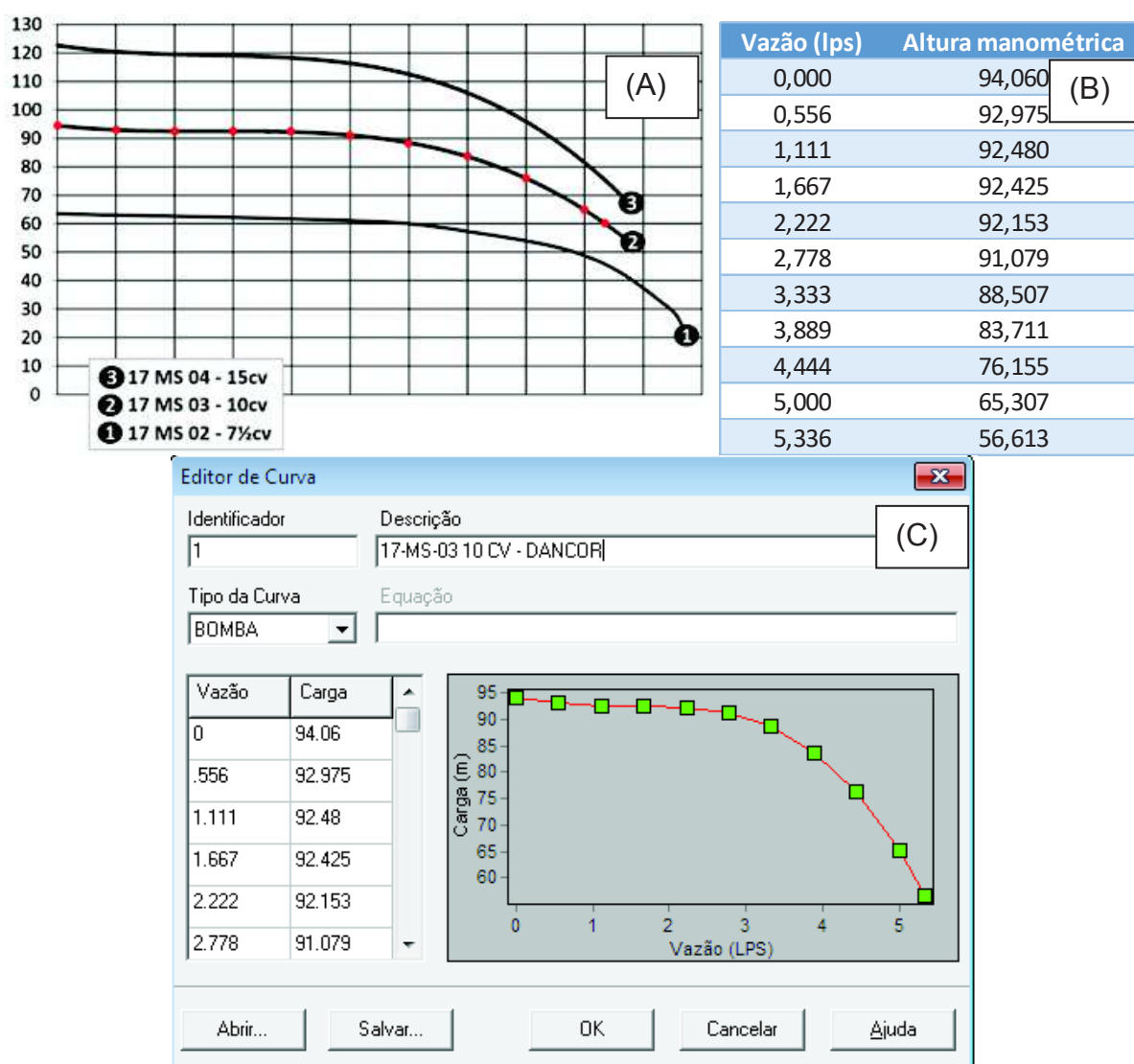


Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

Em uma situação em que ainda não se sabe a altura manométrica, esta pode ser determinada dentro do próprio Software a partir da vazão de projeto, como mostrado em tópico futuro.

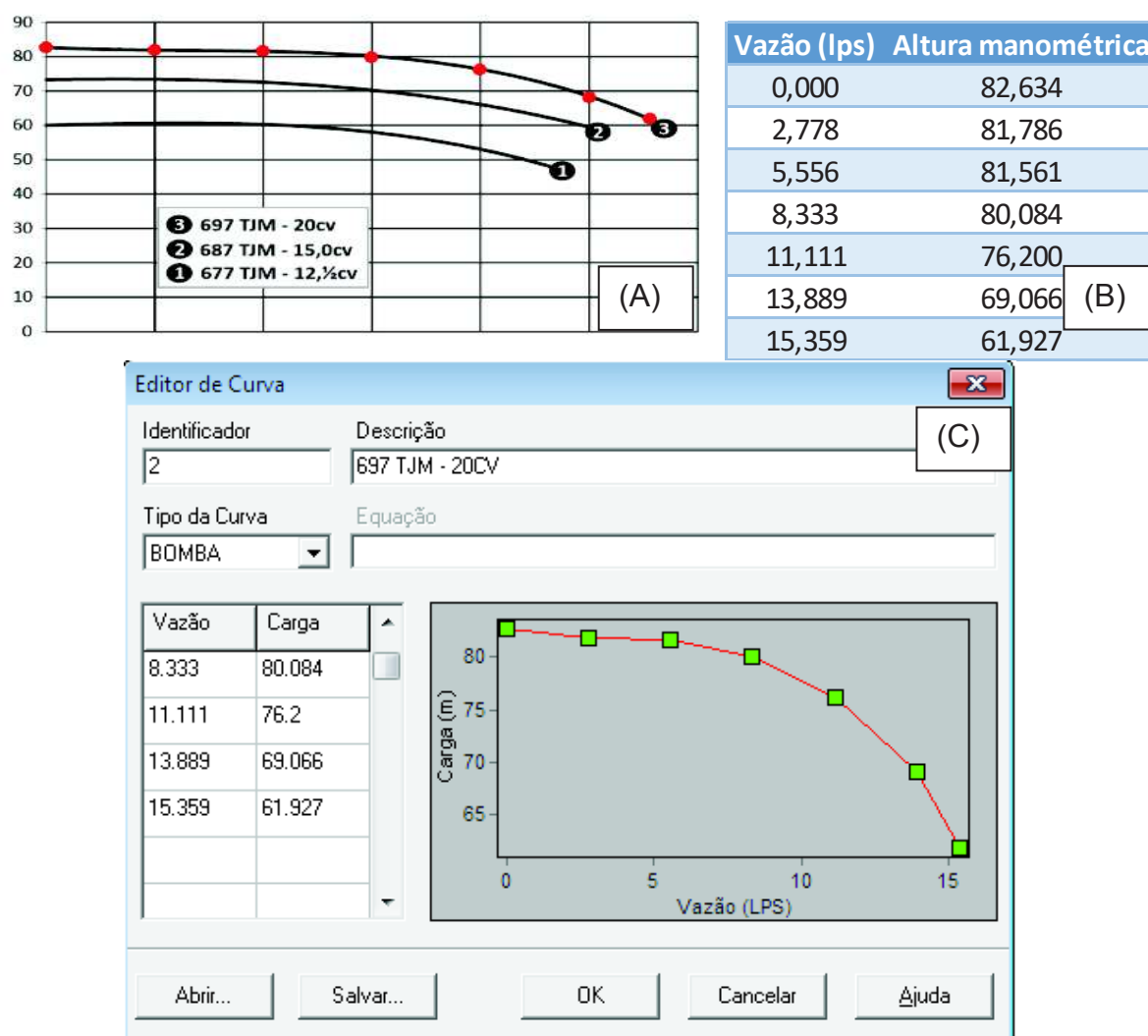
Dentro do software há três formas de definir a curva de uma bomba. Definindo um, três ou mais de três pontos. Nos dois primeiros casos é realizada uma interpolação onde se define uma fórmula exponencial. No terceiro, segmentos de retas são formadas. Do dimensionamento realizado por Justino e Êlcio (2012) foram escolhidas para análise as curvas da Dancor, 2 polos de 3500 rpm, de 10 e 20 CV. Os pontos foram levantados, por meio gráfico, e dentro do programa, ambas se apresentam como diversos segmentos de reta, como mostradas nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Página de dados: Gráfico 17 MS 03 - 10 CV (A), Tabela obtida (B) e Gráfico após inserção no programa (C)



Fonte: Autoria própria

Figura 25– Página de dados: Gráfico 697 TJM - 20 CV (A), Tabela obtida (B) e Gráfico após inserção no programa (C)



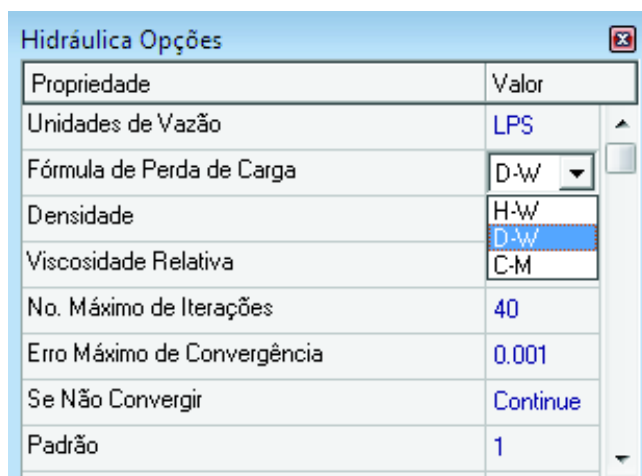
Fonte: Autoria própria

Com as curvas salvas dentro do programa o passo seguinte é determinar a fórmula para cálculo da perda de carga. O programa fornece três opções:

- Fórmula de Hazen-Williams;
- Fórmula de Darcy-Weisbach;
- Fórmula de Chézy-Manning.

Como o dimensionamento foi realizado pela fórmula universal (Darcy-Weisbach), esta será a escolhida. Essa escolha é realizada no menu Projeto, Opções de simulação. A escolha é realizada clicando em “D-W”, conforme Figura 26.

Figura 26 – Página de dados



Propriedade	Valor
Unidades de Vazão	LPS
Fórmula de Perda de Carga	D-W
Densidade	H-W D-W C-M
Viscosidade Relativa	C-M
No. Máximo de Iterações	40
Erro Máximo de Convergência	0.001
Se Não Convergir	Continue
Padrão	1

Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

5.3.1 Simulação estática

Em seguida, já se pode realizar a simulação estática do sistema, clicando no botão de executar simulação . Quando finalizado, o programa fornece os resultados, que podem ser expostos na tela. As propriedades calculadas, em relação aos nós (incluindo reservatórios), e possíveis de serem mostradas são:

- Pressão;
- Carga hidráulica;
- Cota;
- Consumo base;
- Consumo;
- Qualidade;
- Qualidade inicial.

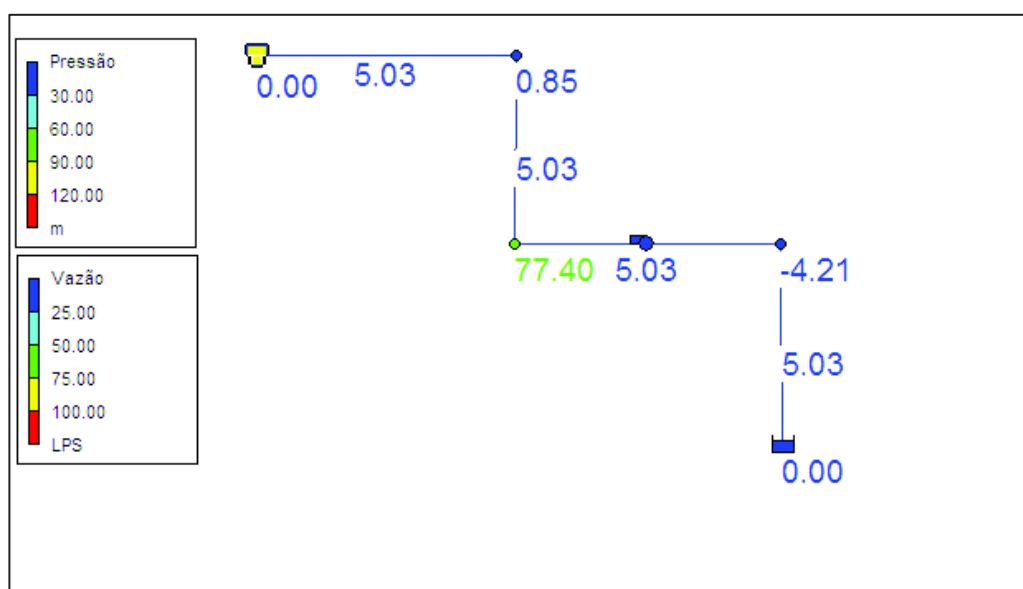
Já para os trechos, as possibilidades são:

- Vazão;
- Velocidade;
- Perda de Carga;
- Fator de Atrito
- Comprimento;
- Diâmetro;
- Rugosidade;
- Coeficiente F de escoamento;

- Coeficiente de reação na parede;
- Taxa de reação;
- Qualidade.

A vazão requisitada, de acordo com o dimensionamento, é de 5 l/s, para que seja bombeada em um período de 8 horas. Os resultados mostram, para a bomba de 10 CV, uma vazão de 4,48 l/s, já para a bomba de 20 CV, uma vazão de 5,03 l/s. Portanto, a primeira bomba não apresenta um ponto de funcionamento com vazão adequada para o tempo de funcionamento requisitado. A segunda apresentou vazão suficiente. Abaixo, a Figura 27 apresenta o resultado com as pressões nos nós (em metros) e vazões nos trechos (em litros por segundo).

Figura 27 – Mapa após simulação



Fonte: Autoria própria

Após as simulações surgem as possibilidades de análises. Pressão e perda de carga podem ser verificados. A perda de carga no recalque apresentou um valor de 31m e na sucção um valor de 0,6m, diferentes em 1,08% e 1,7%, respectivamente, do dimensionamento realizado por Justino (2012), que são de 30,67m e 0,61m. Os resultados estão condensados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 – Comparativo de resultados

	Perda de carga (m)		Erro relativo
	Obtidas no software	Resultado obtido no dimensionamento	
Sucção	0,6	0,61	1,08%
Recalque	31	30,67	1,70%

Fonte: Autoria própria

Uma funcionalidade básica do sistema é a possibilidade da inserção de uma imagem de fundo. Esta pode ser em formato metafile ou bitmap. Clicando no menu Arquivo e Importar Imagem, é possível realizar o processo que tem o resultado apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Sistema de recalque sobre imagem de fundo



Fonte: Autoria própria

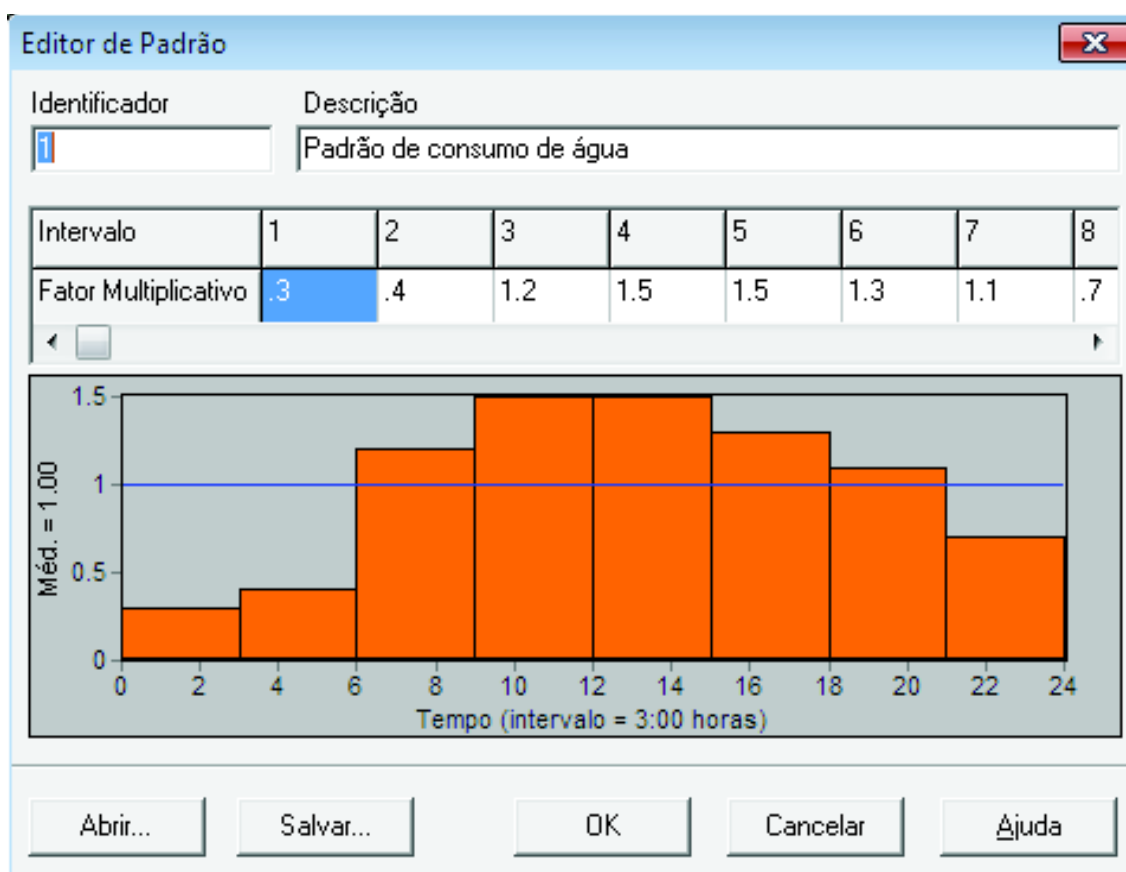
5.3.2 Simulação dinâmica

O software também oferece a opção de serem realizadas simulações que mostram variações do sistema no decorrer do tempo. Para tal, é necessário acrescentar padrões temporais e tempos de simulação. Os padrões temporais são utilizados para representar a variação de demanda no decorrer do tempo. Um fator multiplicador é aplicado em um tempo base, que pode ser programado. As opções de tempo estão na janela Navegador – Opções – Tempos. Os padrões de tempo são adicionados na janela Navegador – Padrões. Para efeito de simulação, foi

considerado o $k_1=1,5$ (hora de maior consumo). A distribuição do padrão de consumo é mostrada na Figura 29.

Atenção deve ser dada às mensagens de erro emitidas, além das interpretações tomadas. A forma como o EPANET desenvolve seus algoritmos permite que a simulação apresente resultados incompatíveis com a realidade. Como exemplo, se o nó se apresentasse muito distante, e uma vazão de consumo definida, a vazão pode provocar uma perda de carga maior do que a diferença de cota geométrica e, teoricamente, uma pressão negativa. Na Figura 30, é mostrado um exemplo de erro após acontecerem pressões negativas.

Figura 29 – Mapa após simulação



Fonte: Autoria própria

Figura 30 – Erro detectado por causa de pressões negativas

```

Página 1                               Sun Mar 18 15:00:36 2018
*****
*                               E P A N E T                               *
* Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento *
*       Simulação de Redes de Distribuição                          *
*       Versão 2.0 - Português (Brasil) - Build(2.00.12)           *
*****

Simulação iniciada Sun Mar 18 15:00:36 2018

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 9:00:00 horas.

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 9:40:09 horas.

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 10:00:00 horas.

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 10:23:53 horas.

ADVERTÊNCIA: Pressões negativas às 11:00:00 horas.

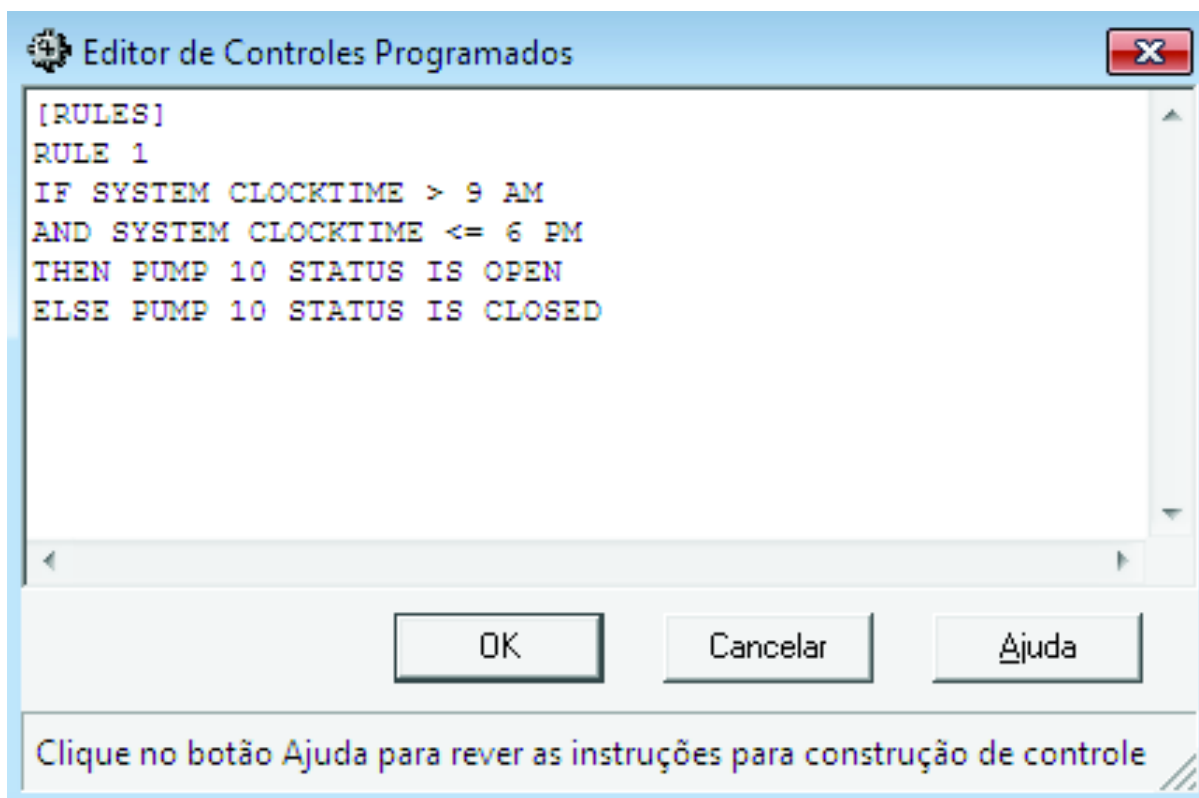
```

Fonte: Print screen do software EPANET 2.0

5.3.3 Controles programados

A função dos controles programados é de permitir alterações dos elementos do sistema durante o tempo da simulação. O Manual do EPANET apresenta sua formatação específica para a formatação de regras. Para a introdução ao tema, foi aplicado à simulação do sistema a condição que a bomba só funcionaria das 9:00 horas até as 16:00 horas. O código para que esse comando fosse executado está descrito na Figura 31.

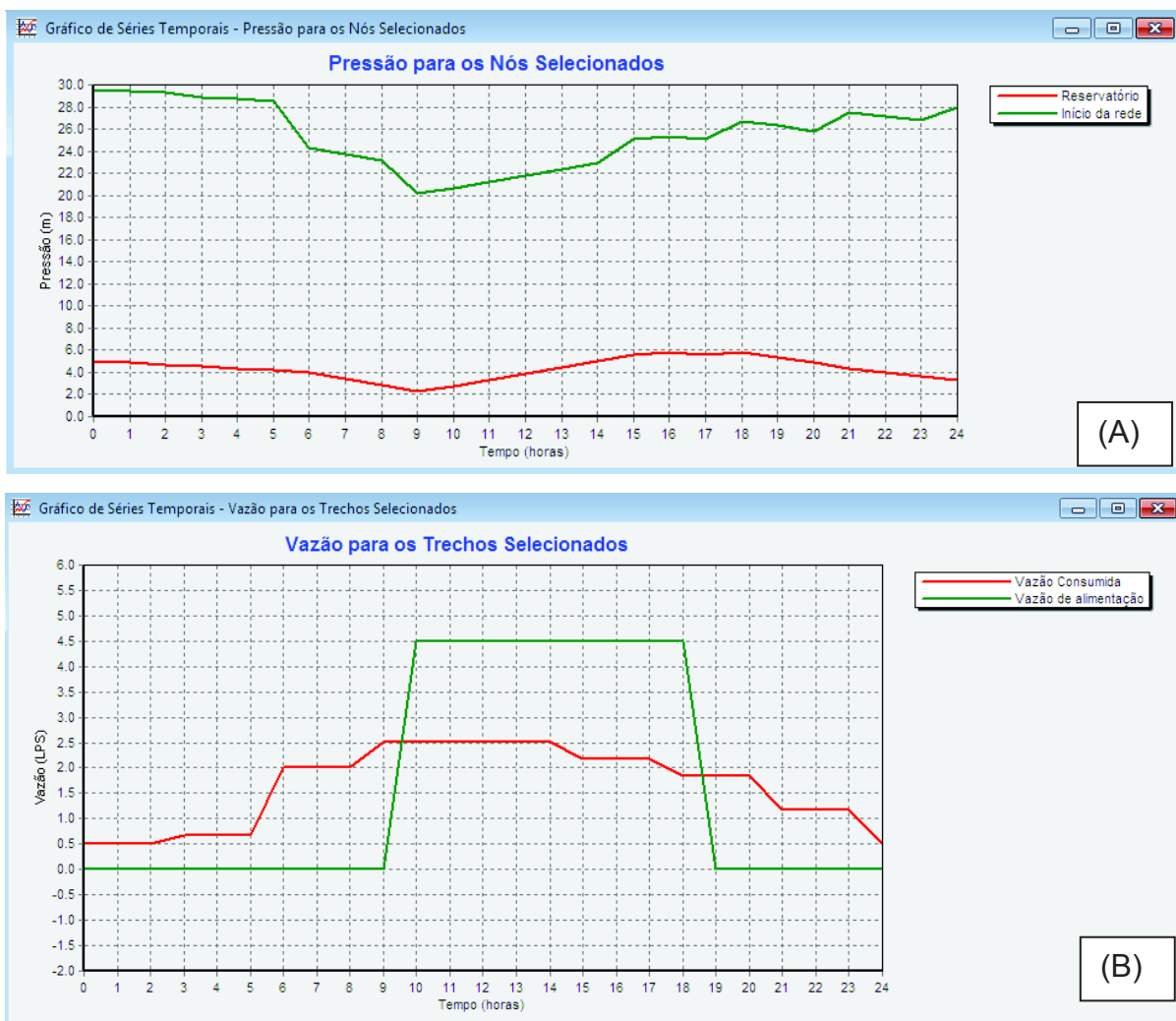
Figura 31 – Controle programado utilizado



Fonte: Autoria própria

Diversas propriedades dos sistemas representados podem ser organizadas em gráficos. Os tipos são de série temporal, perfil, isolinhas, frequências e balanço de vazão. Os gráficos de série temporal foram utilizados para mostrar a variação de vazão nos trecho e pressão nos nós e reservatório. Para adicionar um gráfico, basta selecionar o elemento, o qual se quer ver a variação de alguma medida e em seguida no ícone de gráfico . Na Figura 32A é possível perceber que a variação da pressão na rede se mostrou maior do que a variação de pressão no reservatório (que representa o nível da água dentro deste). Serve para a análise verificar o quanto a vazão elevada em horários de maior consumo pode influenciar nas perdas de carga, no sentido de diminuir a pressão. Já na Figura 32B fica evidente o funcionamento do controle

Figura 32 – Gráficos extraídos após simulação: pressão para nos nós (A) e vazão nos trechos (B)



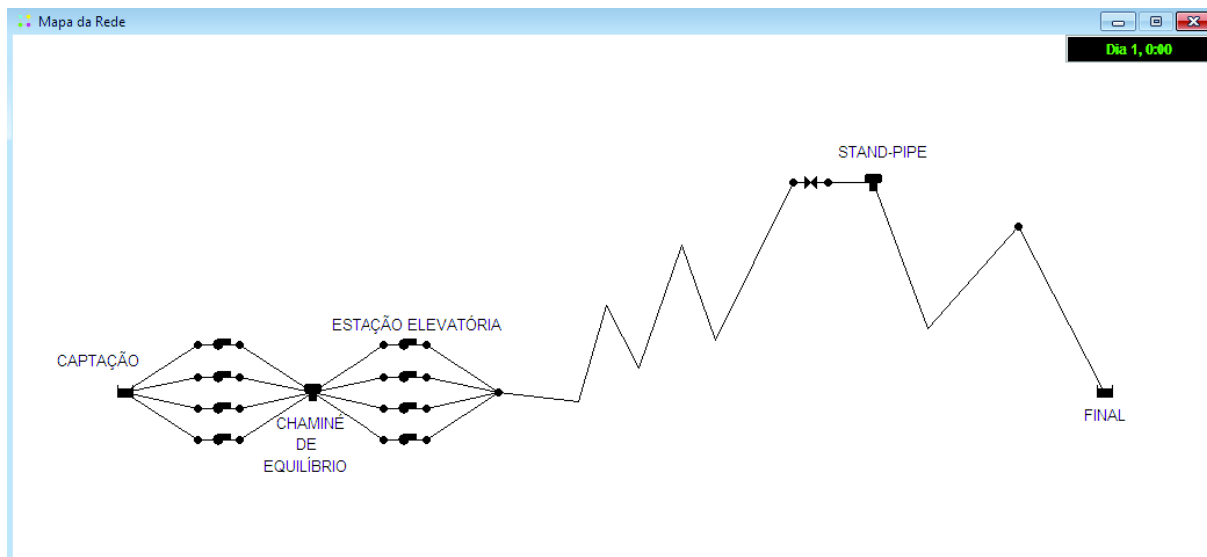
Fonte: Autoria própria

5.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA TAQUACETUBA DE TRANSFERÊNCIA DE VOLUMES

Os dados de cada elemento devem ser digitados dentro dos respectivos quadros de suas propriedades. São extensões e rugosidade das redes, cota dos pontos, diâmetro, cotas e níveis de água dos reservatórios, além de atribuir às bombas as suas curvas características. A Válvula Sustentadora de Pressão (PSV) na entrada

do Stand-Pipe, que aparece no esquema da Figura 33, representa a entrada da tubulação por cima¹.

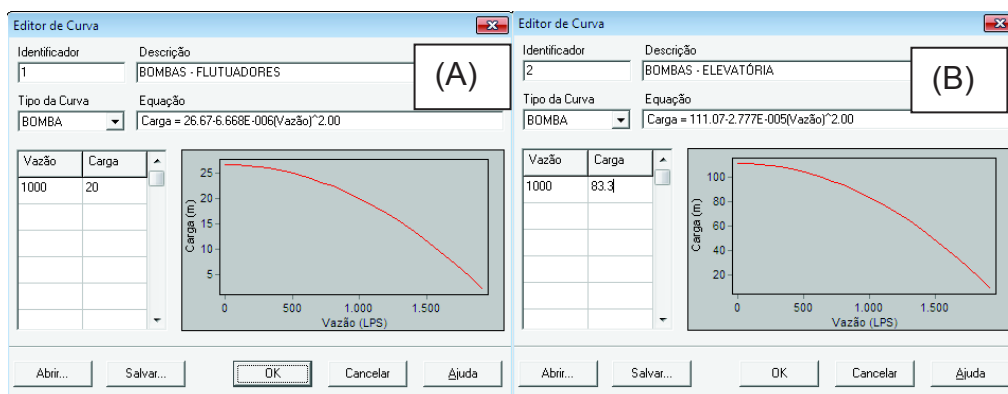
Figura 33 – Representação na interface do programa



Fonte: Autoria própria

Dentro do Software EPANET, as curvas dos dois tipos de bombas (quatro iguais na captação e quatro iguais na elevatória) foram definidas, para este caso, a partir de um par de valores de vazão e altura manométrica, que representam o ponto ótimo de funcionamento da bomba tendo como resultado os gráficos mostrados na Figura 34. Esses pontos ótimos foram fornecidos por Shiromoto (2005) em seu trabalho.

Figura 34 – Esquema já montado no programa: Curva para bombas nos flutuantes (A) e Curva para bombas na elevatória (B)

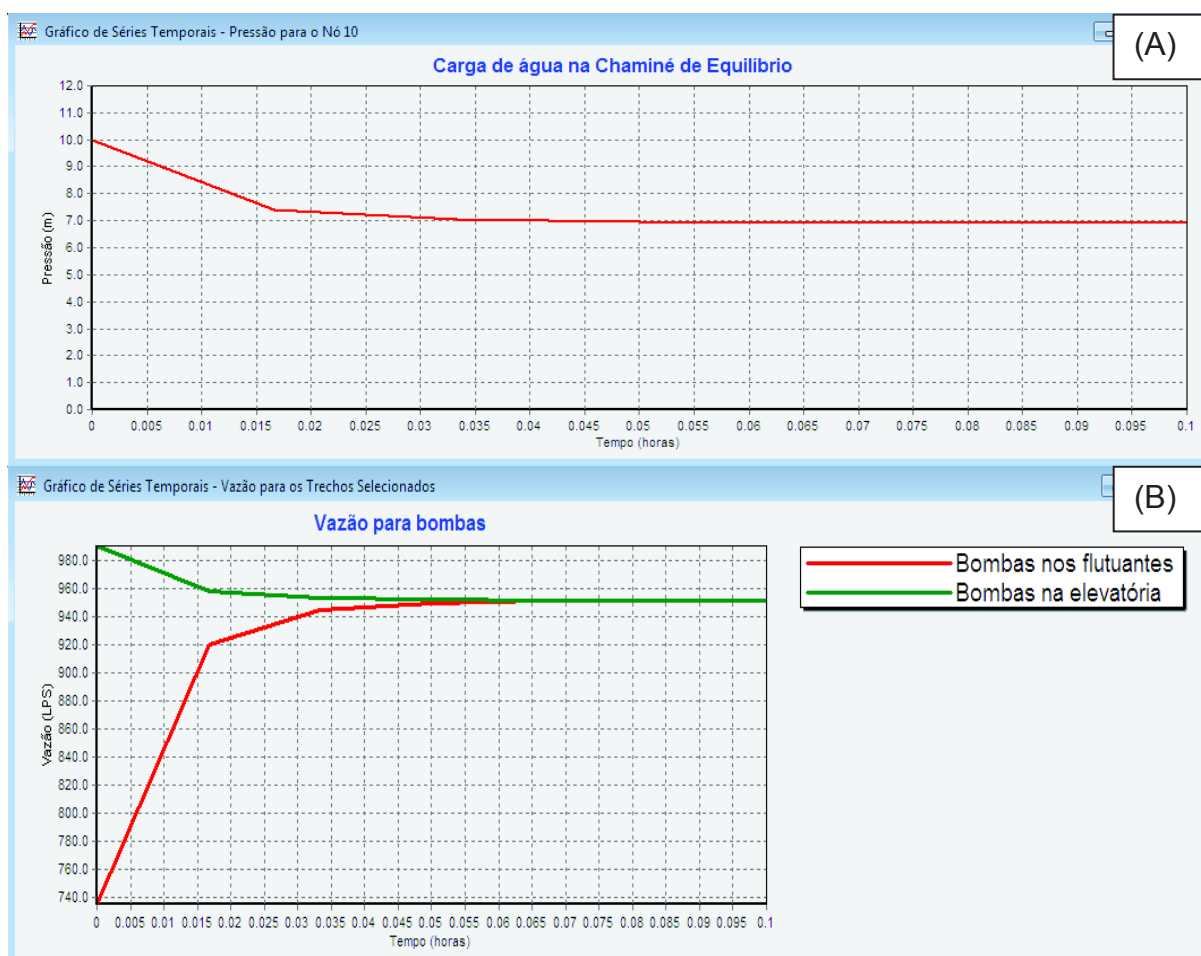


Fonte: Autoria própria

¹ A apresentação normal do programa representa uma entrada da tubulação por baixo. Com a altura da entrada por cima como parâmetro da PSV, esta evita variação da pressão à montante do reservatório devido variação da altura da coluna líquida durante o funcionamento.

A simulação foi configurada para um tempo de 10 horas. Após a realização dessa simulação é possível tirar as primeiras conclusões. A parte do sistema à montante do Stand-Pipe apresentou equilíbrio dinâmico decorridos sete minutos de simulação. As vazões se igualaram à montante e jusante da chaminé de equilíbrio, que também teve seu nível de água estabilizado.

Figura 30 – Esquema já montado no programa: nível de água na chaminé de equilíbrio (A) e vazões nas bombas à montante de à jusante da chaminé de equilíbrio (B)



Fonte: Autoria própria

A influência da carga hidráulica da chaminé de equilíbrio nas vazões das bombas é perceptível com a análise dos gráficos da Figura 30A. Quanto maior o nível de água neste elemento, a altura manométrica torna-se maior para as bombas nos flutuantes e menor para as bombas na elevatória. Como a vazão apresenta uma relação inversamente proporcional à altura manométrica, quanto maior a carga de água na chaminé menor será a vazão nas bombas dos flutuantes e maior será a vazão

nas bombas da elevatória. O balanço de vazão negativo faz com que o nível da carga hidráulica na chaminé de equilíbrio reduza até atingir um nível estável.

Um outro fator importante de ser observado é que o software EPANET considera que todo escoamento ocorre sobre pressão em todos os trechos. Quando ocorre uma situação que na prática é um escoamento livre, a representação fica distorcida. O gráfico de vazão à jusante do Stand-Pipe mostra que inicialmente havia uma vazão de aproximadamente 5.000lps e após 18 minutos do início da simulação há um padrão de variação, onde os valores vão de, aproximadamente, 5.000lps até zero (Figura 31). Como a vazão de 5.000 L/s é maior que a vazão de entrada (que é de 3.807 L/s), o volume do Stand-Pipe reduz até atingir o nível mínimo aos 18 minutos (0,3 horas) de simulação. O que ocorre na realidade é que, após esse tempo, o escoamento à jusante passou a ser livre e ter valor igual ao de entrada. Como o escoamento livre não é representado, há essa restrição para casos dessa natureza. O gráfico na Figura 35 mostra que no trecho a jusante a tubulação assume um comportamento de “liga-desliga”.

Figura 35 – Vazão de trecho à jusante do Stand-Pipe



Fonte: Autoria própria

Para que a vazão a jusante ocorra de forma pressurizada, eliminando o escoamento livre, é necessário aumentar a perda de carga no trajeto percorrido pela água. Na prática são utilizados acessórios que promovem a perda de carga localizada. Na simulação, é possível acrescentar elementos que possuem perdas de carga pré-

determinadas. A perda de carga necessária a ser acrescentada pode ser definida algebricamente. Considerando apenas a diferença de cotas entre os reservatórios, pela equação de Bernoulli:

$$Z_1 + P_1/\gamma + V_1^2/2g = Z_2 + P_2/\gamma + V_2^2/2g + \Delta h \Rightarrow Z_1 - Z_2 = \Delta h$$

$$\Delta h_f = 826m - 750m = 76m$$

onde:

$$P_1=P_2=P_{atm};$$

$$Z_1=826 \text{ m (cota da água no Stand-Pipe);}$$

$$V_1=V_2=0;$$

$$Z_2=750 \text{ m (cota na chegada)}$$

$$\Delta h = \Delta h' + \Delta h_c$$

$$\Delta h' = \frac{10,64 Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} L$$

$$\Delta h' = \frac{10,64}{125^{1,85}} \frac{3,807^{1,85}}{1,5^{4,87}} 2586 + \frac{10,64}{125^{1,85}} \frac{3,807^{1,85}}{1,2^{4,87}} 5961 = 46,72 \text{ m}$$

$$\Delta h_c = \Delta h - \Delta h' \Rightarrow \Delta h_c = 76m - 46,72 \text{ m}$$

$$\Delta h_c = 29,28 \text{ m}$$

A Válvula de Controle de Perda de Carga, ou Válvula de Borboleta (TCV) é uma ferramenta disponível no software e não real. Porém pode ser utilizada para representar elementos que geram perda de carga. O parâmetro K pode ser determinado algebricamente. Geralmente as válvulas de perda de carga apresentam um coeficiente de perda de carga singular dependente do seu grau de fechamento. O cálculo de k para essa situação é feito a partir de:

$$h_{fl} = K \times \frac{V^2}{2g}$$

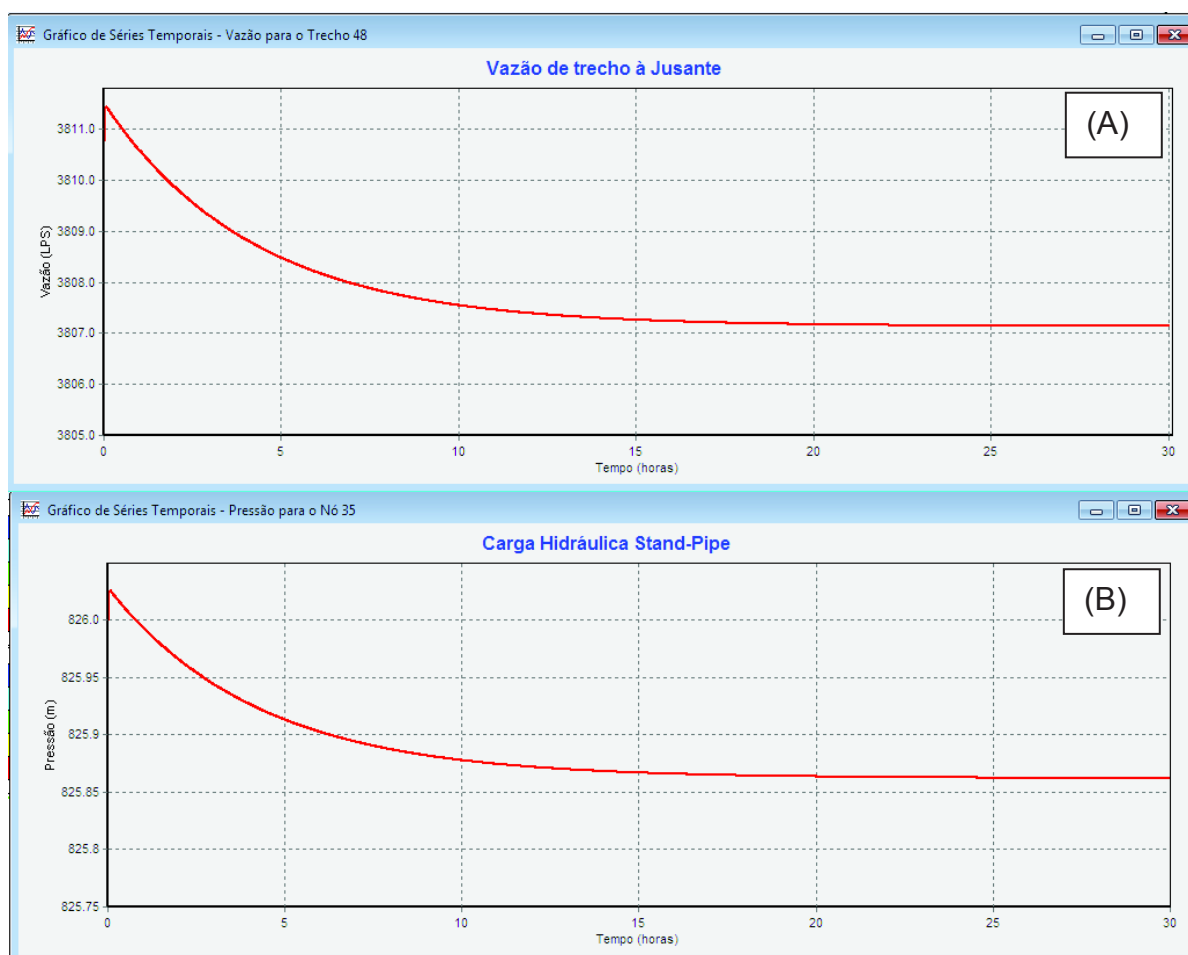
$$V = \frac{Q}{A}$$

$$K = \frac{h_{fl} \times g \times \pi^2 \times D^4}{8Q^2}$$

$$K = \frac{29,28m \times 9,81m/s^2 \times \pi^2 \times (1,2m)^4}{8 \times (3,807m^3/s)^2} = 50,7$$

Ao aplicar a válvula especificada e o valor k determinado, quando realizada a simulação o valor da vazão no trecho a jusante do Stand-Pipe tende a se manter estável. Como o valor inicial da vazão de saída é maior que o de entrada o volume tende a diminuir dentro desse reservatório. Então, o processo iterativo do software atua, pois quanto menor o volume, menor a carga disponível e, conseqüentemente menor a vazão na tubulação à jusante. A vazão assim, vai reduzindo de forma cada vez mais gradual, até atingir valores próximos ao da vazão de entrada. Como é possível verificar na Figura 36, a relação entre o nível do reservatório e da vazão apresenta uma relação direta, e que a vazão se estabiliza em um valor igual ao da vazão de entrada, citada anteriormente, de 3.807 L/s.

Figura 36 – Formato dos gráficos de vazão à jusante (A) e de carga hidráulica (B) do Stand-Pipe



Fonte: Autoria própria

Na aplicação em sistemas de recalque, se mostrou vantajoso por fazer o processo iterativo de forma computacional, podendo se tornar um forte aliado para a

escolha de conjuntos-moto bomba pela fácil identificação do ponto de funcionamento, caso o esquema seja montado de forma adequada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A utilização do Software EPANET para que estudantes com conhecimento básico em hidráulica, ou profissionais, tenham um primeiro contato com a mecânica computacional voltada para o tema é válida. A partir da execução de simulações é possível o estímulo do desenvolvimento cognitivo e a análise crítica de situações estáticas e dinâmicas. Algumas particularidades nas simulações podem ser ressaltadas.

No que diz respeito às simulações, para situações que envolvem muitas equações e soluções que requerem iterações a utilização do programa se mostra muito vantajosa, por evitar um trabalho algébrico que pode se tornar complexo.

Já em casos que a comparação é feita com resultados encontrados de fórmula analítica, geralmente apresentou erros, alguns devido arredondamentos feitos pelos algoritmos, ou também pelo fato do software não ter sido idealizado para indicar resultados a partir de cálculos de integrais.

De modo geral, por apresentar uma interface que exige do usuário o conhecimento básico e uma interação aguda com as ferramentas, participando de maneira muito intensa da construção dos esquemas, o EPANET se torna um ótimo aliado para o desenvolvimento e aplicação dos conhecimentos, concomitantemente a introdução aos meios tecnológicos.

6.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possível trabalho futuro temos a proposta de utilizar o Software EPANET para aplicar o conhecimento sobre dimensionamento de redes de distribuição para avaliar redes de distribuições reais, buscando calibrar o esquema montado no software, de forma permitir aliar teoria e prática. Assim, por meio da análise de erros e divergências encontradas entre o modelo computacional e o real, poderá ocorrer a aplicação objetiva dos ensinamentos e exame crítico dos resultados obtidos por meio de software.

Também é oportuno a realização de trabalhos voltados ao cálculo numérico, verificando os algoritmos, identificando possíveis falhas e melhorias que possam ser implementadas no EPANET, por ser um software aberto. Assim, haveriam possíveis reduções de erros, e até mesmo o acréscimo de novas funcionalidades..

7. REFERÊNCIAS

ANTONOWICZ, A.; BRODZIAK, R.; BYLKA J.; MAZURKIEWICZ, J.; WOJTECKI, S.; ZAKRZEWSKI, P. **Use of EPANET solver to manage water distribution in Smart City.** EDP Science. Disponível em: <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/05/e3sconf_iwa2018_01016.pdf>. Acesso em: 26 mar 2018.

AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Manual de Hidráulica.** São Paulo: Editora Blucher. 8ª edição, 1998.

COELHO, M. M. L. P.; BAPTISTA, M. B. Adução. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Org.). **Abastecimento de Água Para Consumo Humano.** 2 v. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. p. 441-447.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; ARAÚJO, J. K. **Dimensionamento econômico de redes de abastecimento de água utilizando o EPANET e a linguagem DELPHI.** In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6, 2006. João Pessoa. **Anais...** (online). João Pessoa. UFPB. Disponível em: <<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS.HTM>>. Acesso em: 20 de fev de 2018.

COUTINHO, R. S.; SOARES, A. K. **Simulação de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET.** . Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, v.22, n.4, jul/ago. 2017. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/esa/v22n4/1809-4457-esa-s1413-41522017163428.pdf>. Acesso em: 19 fev 2018

DACACH, N. G. **Sistemas Urbanos de Água.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1975.

DANCOR. **Biblioteca.** Disponível em: <<http://www.dancor.com.br/dancor-site-novo/public/biblioteca/catalogos>>. Acesso em: 14 de mar 2018.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** LTC, 6ª edição. 2004.

GAIO, M. M. Mecânica computacional aplicada ao abastecimento de de água. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Org.). **Abastecimento de Água Para Consumo Humano.** 2 v. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. p. 751-798.

GRUNDFOS. **Product Center.** Disponível em: <<https://product-selection.grundfos.com/front->>. Acesso em: 14 mar 2018.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de Água Para Consumo Humano.** 1 v. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de Água Para Consumo Humano.** 2 v. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

JUSTINO, D.; NOGUEIRA, E. Dimensionamento do sistema de recalque para abastecimento de água da comunidade de Macundú, distrito de São João Marcos, município de Rio Claro, Rio de Janeiro. **Cadernos UniFOA.** Volta Redonda. nº 18. abr. 2012. Disponível em: <

<http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/viewFile/1080/942>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL – LAHC. Fortaleza. Disponível em: <www.lahc.ufc.br/>. Acesso em: 25 abr. 2018.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral**. Edição do autor. Coimbra, Portugal. 1983.

MARTINS, F. M. **Estudo de caso do sistema de abastecimento e distribuição de água da cidade de Viçosa- MG**. In: SEMANA ACADEMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO. 2016. Viçosa. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/13907/204-1256-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 fev 2018.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 3ª edição. São Carlos: EESC-USP, 2004.

PRINCE, A. A. Captação de água de superfície. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Org.). **Abastecimento de Água Para Consumo Humano**. 1 v. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. p. 325-371.

PRINCE, A. A. Rede de distribuição. In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Org.). **Abastecimento de Água Para Consumo Humano**. 2 v. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. p. 615-672.

REIS, L F. R. R.; CHEUNG, P. B. **Redução de Vazamentos via válvulas redutores de pressão (VRPs)**. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6, 2006. João Pessoa. **Anais...** (online). João Pessoa. UFPB. Disponível em: <<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS.HTM>>. Acesso em: 20 de fev de 2018.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0: Manual do Usuário**. Tradução de Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – UFPB, Brasil. 2000.

SHIROMOTO, J.; LEITÃO, J. C., TSUTIYA, M. T. **Operação do sistema Taquacetuba para a transferência de água do reservatório Billings para represa Guarapiranga – Região Metropolitana de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005. Campo Grande/MS. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/l-037.pdf>>. Acesso em 19 mar. 2018.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. R.; COVAS, D. I. C. **Análise hidráulica de sistemas de distribuição de água utilizando o MOC-EPANET**. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 8, 2008. Lisboa. **Anais...** (online). João Pessoa. UFPB. Disponível em: <www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/resumo_viiiiserea.pdf>. Acesso em: 20 de fev de 2018.

TSUTIYA, M. T.. **Abastecimento de água**. São Paulo, Escola Politécnica da USP. 3ª Edição. 2006.