

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Guilherme Weissheimer Pinheiro

**PERDA DE CARGA TOTAL EM REDE DE TUBULAÇÕES:
COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS NUMÉRICO E
EXPERIMENTAL**

Porto Alegre
julho 2014

GUILHERME WEISSHEIMER PINHEIRO

**PERDA DE CARGA TOTAL EM REDE DE TUBULAÇÕES:
COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS NUMÉRICO E
EXPERIMENTAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Augusto Magalhães Endres

Porto Alegre
julho 2014

GUILHERME WEISSHEIMER PINHEIRO

**PERDA DE CARGA TOTAL EM REDE DE
TUBULAÇÕES: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
NUMÉRICO E EXPERIMENTAL**

Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2014

Luiz Augusto Magalhães Endres
Dr. pelo PROMEC/UFRGS
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eng. José Vilmar Viegas
Mst. pela UFSM

Prof. Marcelo Giulian Marques (UFRGS)
Dr. Université Laval

Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres
Dr. Pelo PROMEC/UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, família e amigos que sempre me apoiaram nessa grande jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Leonardo Hoff Pinheiro e Cynthia Hack Weissheimer, por meus ensinamentos e por me apoiarem incondicionalmente durante minha vida.

Agradeço ao Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres, orientador deste trabalho, por estar sempre a disposição para esclarecer dúvidas que surgiram durante o trabalho e pelo incentivo dado ao longo deste.

Agradeço ao Prof. Eduardo Pedro Eidt, pela ajuda na escolha do tema e por toda ajuda fornecida ao longo deste trabalho.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt, por todas as revisões, correções e sugestões realizadas ao longo do trabalho, fazendo com que a elaboração deste fosse possível.

Agradeço a equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas pelo apoio e por direcionarem a minha carreira para área de recursos hídricos e por ajudarem na realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos, colegas de graduação e família, pelo companheirismo e descontração essenciais para o término do trabalho.

Mais fácil me foi encontrar as leis com que
se movem os corpos celestes, que estão
a milhões de quilômetros, do que definir as leis do
movimento da água que escoam frente aos meus olhos.

Galileu Galilei

RESUMO

A perda de carga é parâmetro fundamental para dimensionamento de qualquer obra hidráulica, desde simples instalações hidrossanitárias prediais até grandes estações de recalque. Com o aumento da tarifa de energia elétrica é, cada vez mais, necessária a determinação precisa dessa grandeza, já que influi diretamente na potência requerida por bombas hidráulicas. São diversos os métodos e programas de computador que permitem a avaliação da perda de carga assim como estudos realizados para o estabelecimento de coeficientes requeridos para o seu cálculo. Neste trabalho, é analisada a perda de carga ocorrida na rede de distribuição do Laboratório de Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento (Lenhs) da UFRGS, para diferentes cenários de abastecimento e vazões. Os dados obtidos no modelo experimental foram confrontados com os dados calculados pelo modelo numérico de simulação de sistemas de distribuição de água EPANET. A escolha do software foi feita tendo em vista seu grande prestígio e sua comprovada aplicabilidade para redes de distribuição urbanas, sendo ele utilizado por diversas companhias de saneamento de todo o mundo. A fundamentação teórica do trabalho se deu a partir do estudo de bibliografia especializada, abrangendo desde as propriedades do fluido que influenciam na perda de carga até metodologias para soluções de redes complexas. Para a comparação de resultados entre os dois modelos, numérico e experimental, foram empregadas duas análises distintas. Na rede ramificada foram comparadas diretamente as perdas de carga, já no abastecimento em malha foi avaliada a diferença entre a vazão passante em cada trecho, pois a distribuição da vazão é realizada pelo software de maneira que haja equilíbrio energético na rede. Por fim, foi feita uma discussão sobre a aplicabilidade do modelo numérico para avaliação da perda de carga na rede de distribuição do Lenhs, na qual é destacada a influência do elevado número singularidades a dificuldade que eles acarretam na correta determinação dessa importante grandeza.

Palavras-chave: Perda de Carga em Obras Hidráulicas. EPANET.
Perda de Carga em Redes de Distribuição de Água.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de relações das etapas do trabalho	27
Figura 2 – Esquema de uma rede ramificada	47
Figura 3 – Esquema de uma rede malhada	48
Figura 4 – Vista geral da bancada fixa do Laboratório de Eficiência Hidráulica e Energética	52
Figura 5 – Sistema supervisor do Lenhs	52
Figura 6 – Estação de recalque do Lenhs	53
Figura 7 – Torneira e mecanismo de abertura	54
Figura 8 – Válvula solenoide Jefferson 1342BA12	55
Figura 9 – Válvula esfera manual	55
Figura 10 – Válvula esfera com atuador pneumático	55
Figura 11 – Medidor de vazão eletromagnético	56
Figura 12 – Transdutor de pressão	56
Figura 13 – Rede de distribuição do Lenhs modelada no software EPANET	57
Figura 14 – Percurso do ensaio de rede ramificada	59
Figura 15 – Percurso ensaiado para as duas maiores vazões da rede em malha	60
Figura 16 – Relação entre a perda de carga singular e a perda de carga total	63
Figura 17– Diferença percentual entre a perda de carga medida e calculada (a) – Trechos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 (b) – Trechos 1 e 10	64
Figura 18 –Relação entre a diferença da perda de carga medida e calculada e a pressão medida (a) – Trechos 1 ,2, 3, 4, 5 ,6, 7, 8, 9 e 10 (b) – Trecho 3	65
Figura 19 – Variação do Coeficiente K experimental em relação ao número de Reynolds	66
Figura 20 – Comparação entre valores de perda de carga total calculada através de coeficientes K sugeridos pela bibliografia e observados no Lenhs	67
Figura 21–Relação entre a diferença da perda de carga medida e calculada com o coeficiente K obtido experimentalmente (a) – Trechos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 (b) – Trechos 1 e 10.....	68
Figura 22 – Relação entre a diferença da perda de carga medida e calculada com o coeficiente K obtido experimentalmente e a pressão medida	68
Figura 23 – Divergência na vazão calculada com os coeficientes sugeridos pela bibliografia	70
Figura 24 – Diferença percentual na vazão calculada com os coeficientes medidos na instalação	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de custo dos componentes de um sistema de abastecimento de água, segundo população atendida em habitantes	23
Tabela 2 – Variação de “ v ” da água doce com a temperatura	31
Tabela 3 – Limites dos regimes de escoamento para condutos de seção circular	32
Tabela 4 – Rugosidade dos tubos (valores de e em metros)	39
Tabela 5 – Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams	41
Tabela 6 – Valores aproximados do coeficiente de perda de carga singular	44
Tabela 7 – Perdas localizadas expressas em comprimento equivalente a diâmetros de canalização retilínea	54
Tabela 8 – Relação das singularidades e características geométricas de cada trecho	58
Tabela 9 – Resumo dos ensaios em rede ramificada	60
Tabela 10 – Resumo dos ensaios de rede malhada	61
Tabela 11 – Dados medidos e calculados para a rede ramificada	62
Tabela 12 – Coeficientes de perda de carga singular calculados a partir do modelo experimental	66
Tabela 13 – Coeficientes de perda de carga singular calculados a partir do modelo experimental	69
Tabela 14 – Diferenças na vazão calculada através dos coeficientes sugeridos pela bibliografia e calculados a partir do modelo experimental	71

LISTA DE SIGLAS

EPA – U. S. Environmental Protection Agency

Lenhs – Laboratório de Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

SI – Sistema Internacional de Unidades

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área (m²)

C – coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams

D – diâmetro (m)

e – rugosidade da parede (m)

EB – energia aplicada ou retirada por alguma máquina (m)

f – fator de perda de carga da equação de Darcy-Weisbach

g – aceleração da gravidade (m/s²)

ΔH – perda de carga total (m)

hl – perda de carga linear (m)

hs – perda de carga singular (m)

ht – perda de carga total (m)

htcalc – perda de carga total calculada (m)

htmed – perda de carga total medida (m)

K – coeficiente de perda de carga singular

kWh – kilo Watt hora

L – comprimento (m)

\vec{n} – vetor unitário normal

p – pressão (Pa)

Pmed – pressão medida no Lenhs (m)

Q – vazão volumétrica (m³/s)

Q_{med} – vazão volumétrica medida (l/s)

Q_{calc} – vazão volumétrica calculada (l/s)

Re – número de Reynolds

t – tempo (s)

V – velocidade média (m/s)

V' – volume (m³)

z – cota (m)

ρ – massa específica (kg/m³)

γ – peso específico (N/m³)

τ – tensão de cisalhamento (N/m²)

μ – coeficiente de viscosidade dinâmico (kg/(m.s))

ν – coeficiente de viscosidade cinemático (m²/s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	25
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	25
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL DO TRABALHO	25
2.3 PRESSUPOSTO	25
2.4 DELIMITAÇÕES	25
2.5 LIMITAÇÕES	25
2.6 DELINEAMENTO	26
3 PERDA DE CARGA	29
3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS	29
3.1.1 Massa Específica	29
3.1.2 Viscosidade	30
3.2 NÚMERO DE REYNOLDS	31
3.3 EQUAÇÕES BÁSICAS DA HIDRODINÂMICA	32
3.3.1 Equação da Continuidade	33
3.3.2 Equação da Quantidade de Movimento	34
3.3.3 Equação de Bernoulli	34
3.4 PERDA DE CARGA LINEAR	36
3.4.1 Equação de Darcy-Weisbach	36
3.4.1.1 Fator de Perda de Carga para escoamentos laminares	37
3.4.1.2 Fator de Perda de Carga para escoamentos turbulentos	38
3.4.2 Fórmula de Hazen-Williams	40
3.4.3 Comparação Entre Métodos	41
3.5 PERDA DE CARGA SINGULAR	42
3.5.1 Método dos Coeficientes K	42
3.5.2 Método dos Comprimentos Equivalentes	44
4 REDES DE DISTRIBUIÇÃO	45
4.1 REDES EM SÉRIE	45
4.2 REDES EM PARALELO	46
4.3 REDES RAMIFICADAS	46
4.4 REDES MALHADAS	47
4.5 MÉTODO DE HARDY-CROSS	48
4.6 EPANET	49

5 MATERIAIS E MÉTODOS	51
5.1 LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM SANEAMENTO	51
5.2 INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS	52
5.3 MODELAGEM NUMÉRICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO LENHS	57
5.4 ENSAIOS REALIZADOS	59
5.4.1 Ensaio de Rede Ramificada	59
5.4.2 Ensaio de Rede Malhada	60
5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
5.5.1 Análise dos Resultados Obtidos na Rede Ramificada	61
5.5.2 Análise dos Resultados Obtidos na Rede em Malha	69
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A	77
APÊNDICE B	81

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por água e o aumento da mancha urbana fazem com que a otimização, tanto de custos quanto de qualidade de atendimento, de sistemas de abastecimento de água tome maior importância. Dentre todos os componentes destes, unidades de captação, tratamento, estação elevatória, adução, reservatórios, rede de distribuição e ligações prediais, esse trabalho analisa especialmente as características hidráulicas das redes de distribuição.

Num sistema de abastecimento, entende-se por rede de distribuição: “Parte do sistema de abastecimento de água formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores de forma contínua, em quantidade e pressão recomendada.” (TSUTIYA, 2006, p. 10). O custo da instalação da rede em relação ao todo faz com que seu dimensionamento necessite de uma análise especialmente criteriosa, pois, segundo esse mesmo autor, o montante destinado a essa parte do sistema é o mais significativo e tende a aumentar em função da população atendida, isso pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Percentual de custo dos componentes de um sistema de abastecimento de água, segundo população atendida em habitantes

Partes constituintes do sistema	Custo(%)			
	P≤10.000	10.000<P≤40.000	40.000<P≤100.000	P>100.000
Captação	30	20	8	3
Adução	8	9	11	11
Bombeamento	6	5	5	1
Tratamento	12	9	9	5
Reservação	6	6	6	4
Distribuição	38	51	61	76

(fonte: TSUTIYA, 2006, p. 10)

O dimensionamento da rede passa, principalmente, pela determinação dos diâmetros dos tubos, porém, por se tratar de um problema hidráulicamente indeterminado, pode haver mais de uma solução que obedeça à vazão demandada. No entanto, há somente um resultado de custo mínimo, que possui uma peculiaridade, segundo Gomes (2004, p. 68):

Os custos de implantação e de operação são antagônicos, ou seja, quando um aumenta o outro diminui e vice versa. Ao se escolher um diâmetro menor para a adutora, haverá uma diminuição no seu custo de implantação, mas em contra partida, o custo de operação (energético) será maior.

Um dos fatores que influencia a escolha do tipo de material, diâmetro do tubo e traçado da rede é a perda de carga, pois essa influi diretamente no custo operacional, refletindo no consumo de energia por parte das estações de bombeamento. Por perda de carga entende-se a energia dissipada devido à viscosidade do líquido, podendo ser dividida em perda contínua (ou linear), que ocorre em partes contínuas da tubulação, e perda singular (ou localizada), ocasionada por peças especiais, como curvas, reduções, medidores de vazão, registros, etc.

Porém como as redes de distribuição são formadas por mais de uma tubulação ligada de diferentes formas, é necessário, primeiramente, definir-se o tipo de arranjo para, então, determinar-se a metodologia utilizada. Os ensaios realizados, para fim de análise da perda de carga, englobam redes em série, em paralelo e em malhas ou anéis, sendo o último caso o que necessita de tratamento matemático mais complexo através do método de Hardy-Cross.

Assim, nesse trabalho é utilizada a estrutura do Laboratório de Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento (Lenhs), que simula, genericamente, o sistema de abastecimento de uma cidade, para aquisição de dados de pressão e vazão. Posteriormente são ensaiadas as mesmas condições obtidas em modelo físico no modelo numérico EPANET, é feita uma análise dos resultados e uma discussão sobre a aplicabilidade do programa.

Para a apresentação do trabalho, além da introdução, é apresentado no capítulo subsequente o objetivo da pesquisa, a questão da pesquisa, suas limitações e delimitações. A fim de caracterizar o procedimento de pesquisa, é apresentado o delineamento, no qual são expostas as etapas realizadas.

O capítulo 3 contém as definições de perda de carga, a caracterização das propriedades físicas que a influenciam e as equações básicas que regem o escoamento em condutos forçados. No capítulo 4, são caracterizadas as redes de distribuição, seus principais arranjos e metodologias para cálculo, além da apresentação do programa EPANET. O capítulo 5 apresenta as instalações do Lenhs, os ensaios realizados e a análise dos dados obtidos pelos modelos numérico e experimental. No capítulo 6 é feita uma discussão sobre os resultados obtidos e a aplicabilidade do EPANET para a rede de distribuição estudada.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: para a rede de tubulações do Lenhs, qual a diferença de resultados obtidos através dos modelos experimental e numérico para a perda de carga total desse sistema?

2.2 OBJETIVO PRINCIPAL DO TRABALHO

O objetivo principal do trabalho é a validação de modelo numérico para avaliação de perda de carga total em rede de tubulação do Lenhs frente aos resultados obtidos no modelo experimental.

2.3 PRESSUPOSTO

O modelo numérico EPANET é adequado para o cálculo de perda de carga total em rede de distribuição de água.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à análise da rede de distribuição do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (Lenhs) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) fluido empregado nos ensaios é água a temperatura ambiente;

- b) a precisão dos medidores de vazão utilizados no ensaio é de 0.5%;
- c) a precisão dos transdutores de pressão é de 0,02 mca;
- d) os condutos utilizados são de aço galvanizado;
- e) o modelo numérico empregado é o EPANET.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) modelagem da rede de distribuição em programa de cálculo;
- c) definição do programa experimental;
- d) prática de laboratório;
- f) aplicação dos dados experimentais no modelo numérico;
- e) tratamento e análise dos dados adquiridos;
- f) discussão sobre os resultados obtidos.

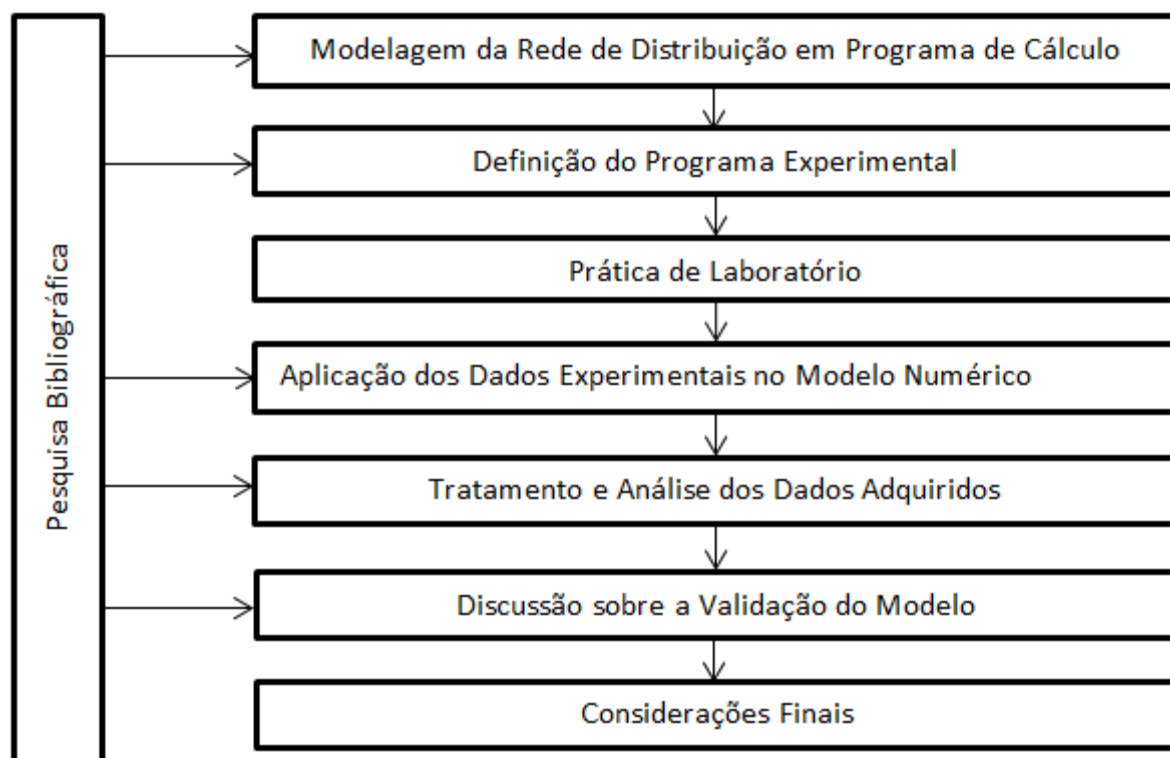
A pesquisa bibliográfica tem por objetivo dar fundamentação teórica ao trabalho. Os assuntos abordados são: definição de rede de abastecimento e suas diferentes configurações e peculiaridades de cálculo, além da análise de metodologias para determinação da perda de carga em função do tipo de escoamento, localização e arranjo das tubulações. Também é caracterizado, de forma breve, o modelo numérico EPANET, programa esse utilizado para comparação com dados obtidos em modelo experimental.

Na fase de modelagem da rede de distribuição em programa de cálculo são inseridos no modelo parâmetros hidráulicos e geométricos provenientes do Lenhs, sendo esses indispensáveis para análise precisa de perda de carga. Comprimentos das tubulações, diâmetros, rugosidade e coeficientes de perda singular são especialmente avaliados.

Os percursos e vazões a serem ensaiados foram definidos na terceira fase a fim de obter uma ampla gama de formatos de rede, como: em série, paralelo e em anéis, além de obter vazões que resultem na faixa de trabalho dos equipamentos. Para tanto, foram realizados ensaios prévios.

Após a escolha das situações a serem simuladas, foi feita a aquisição de dados de pressão para cinco vazões em cada percurso. As vazões e pressões são tomadas digitalmente a partir de transdutores de pressão e medidores eletromagnéticos de vazão localizados na bancada fixa do Lenhs.

Figura 1 – Diagrama de relações das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Para uma correta comparação, foram ensaiadas no modelo numérico, as mesmas vazões e percursos do modelo físico.

A análise dos dados é feita comparando, em cada trecho, a dissipação de energia, tomando como perda de carga, a diferença de pressão lida entre dois manômetros consecutivos. Isso é válido da rede do Lenhs, pois a rede está instalada na mesma cota e não há variação de diâmetro. Após tratados e relacionados os resultados, é feita uma breve discussão sobre a aplicabilidade do método nesta rede específica.

3 PERDA DE CARGA

Por perda de carga, entende-se parte da energia encontrada no fluido em regime dinâmico que é transformada principalmente em calor e, portanto, “perdida”, pois não pode ser recuperada como energia potencial ou cinética (BAPTISTA et al., 2001). Essa perda ocorre no escoamento “[...] devido ao efeito de sua viscosidade ou por atrito interno, unido ao efeito da turbulência ou dos choques entre as partículas do fluido.” (GOMES, 2004, p. 36).

Esse fato e os mecanismos de sua geração são de fundamental importância para a engenharia, pois, segundo Netto et al. (1998, p. 141), “No projeto de uma tubulação, a questão principal é determinar a quantidade de energia necessária para [...] [aduzir] quantidade de água desejada entre um ponto e outro da tubulação.”.

E junto com a vazão, que depende basicamente da demanda, a altura manométrica total, que é a soma do desnível geométrico com a perda de carga total, são os fatores que influenciam na potência requerida para aduzir água.

Neste capítulo são apresentadas as propriedades físicas que mais influenciam na perda de carga. Posteriormente, são expostas as três equações básicas da mecânica dos fluidos necessárias caracterizar o comportamento do escoamento dos fluidos. Por último, os métodos mais consagrados para cálculos de perda de carga linear e singular são descritos.

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS

Para a análise de qualquer problema que envolva mecânica de fluidos é essencial o conhecimento de propriedades que relacionem seu comportamento às solicitações a ele impostas (NETTO et al., 1998). São descritas as principais propriedades que atuam diretamente na perda de carga e no movimento dos fluidos.

3.1.1 Massa Específica

Entende-se por massa específica de um fluido, a sua massa por unidade de volume. O símbolo que representa essa grandeza é a letra grega ρ . De acordo com White (2011, p. 31):

A massa específica dos líquidos é quase constante; a massa específica da água (aproximadamente 1000 kg/m³) aumenta somente 1% se a pressão for aumentada por um fator de 220. Dessa maneira, a maioria dos escoamentos líquidos é tratada analiticamente como aproximadamente ‘incompressível’.

3.1.2 Viscosidade

Baptista et al. (2001, p. 30) definem viscosidade como sendo:

[...] a resistência do fluido à deformação, devido principalmente às forças de coesão intermolecular. Consequentemente, essa propriedade só é evidenciada com o escoamento do fluido, apresentando menor fluidez os fluidos de alta viscosidade e vice-versa.

É “[...] o meio pelo qual se desenvolvem irreversibilidades ou perdas. Sem viscosidade, não há resistência num fluido.” (STREETER; WYLIE, 1982, p. 193). O coeficiente dinâmico, associado à viscosidade pode ser considerado a partir da equação de Newton (fórmula 1), como a constante de proporcionalidade μ entre o gradiente de velocidade para fluidos comuns e a tensão de cisalhamento a ele aplicada, no caso de dependência linear (WHITE, 2011):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento;

μ = coeficiente de viscosidade dinâmico;

du/dy = gradiente de velocidade.

Outro parâmetro usual é o coeficiente de viscosidade cinemático, que Lencastre (1972) define como sendo o quociente entre o coeficiente dinâmico e a massa específica do fluido. Essa grandeza é expressa através da letra grega ν e tem como unidade de medida, no sistema internacional, m²/s. A viscosidade sofre considerável influência da temperatura como demonstra a tabela 2.

Tabela 2 – Variação de “ ν ” da água doce com a temperatura

Temperatura °C	ν (m ² /s)10 ⁻⁹	Temperatura °C	ν (m ² /s)10 ⁻⁹
0	1792	40	657
2	1673	50	556
4	1567	60	478
5	1519	70	416
10	1308	80	367
15	1146	90	328
20	1007	100	296
30	804		

(fonte: NETTO et al., 1998, p. 15)

3.2 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds é um adimensional que relaciona as forças de inércia e as de viscosidade. E “[...] leva em conta a velocidade entre o fluido que escoar e o material que o envolve, uma dimensão linear típica (diâmetro, profundidade, etc.) e o coeficiente de viscosidade cinemático.” (NETTO et al., 1998, p. 133):

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

V = velocidade do fluido;

ν = coeficiente de viscosidade cinemático.

O número de Reynolds é fundamental para a classificação do tipo de escoamento. Como pode ser observado na tabela 3, pelo seu valor define-se se este se encaixa no regime laminar ou turbulento. Isso possibilita o conhecimento das principais causas da perda de carga e a forma como esta deve ser calculada.

Tabela 3 – Limites dos regimes de escoamento para condutos de seção circular

	$Re = VD/ \nu$
Regime Laminar	$Re < 2000$
Transição	$2000 < Re < 4000$
Regime Turbulento	$Re > 4000$

(fonte: adaptado de BAPTISTA et al., 2001, p. 33)

Segundo Streeter e Wylie (1982, p. 115), no escoamento em regime laminar:

[...] as partículas movem-se ao longo de trajetórias suaves, em lâminas ou camadas, com cada uma destas deslizando suavemente sobre a outra. O escoamento laminar é governado pela lei de Newton [...] da viscosidade que relaciona as tensões de cisalhamento com a taxa de deformação angular.

Já o escoamento em regime turbulento tem movimento aleatório e possui acelerações tangenciais à direção do escoamento principal. Ainda, de acordo com Fox et al. (2010, p. 288), o comportamento do fluido neste tipo de escoamento “[...] é causado por pequenas flutuações de velocidade de alta frequência.”. Baptista et al. (2001) e Netto et al. (1998) ressaltam que nos casos práticos de engenharia os regimes são, na grande maioria das vezes, turbulentos excetuando casos nos quais o fluido é muito viscoso ou a velocidade é muito baixa.

3.3 EQUAÇÕES BÁSICAS DA HIDRODINÂMICA

As equações básicas da hidrodinâmica são fundamentais na caracterização do movimento dos fluidos. Streeter e Wylie (1982, p. 109) afirmam que “[...] a natureza do **escoamento** de um fluido real é muito complexa. As leis básicas que descrevem o movimento de um fluido não são de fácil formulação, nem de fácil manejo matemático, de forma que necessita-se de recursos experimentais.”.

São consideradas de extrema importância e, por isso, são apresentadas as equações da continuidade, de quantidade de movimento e de Bernoulli.

3.3.1 Equação da Continuidade

Lencastre (1972, p. 24) define:

A equação da continuidade traduz o seguinte fato físico evidente, da conservação da massa: durante um certo tempo o aumento de massa do fluido, contido num certo volume, é igual à soma das massas do fluido que nele entram diminuída das massas do fluido que dele saem.

A forma integral de cálculo da lei da continuidade para um volume de controle fixo é dada pela fórmula 3 (WHITE, 2011, p. 160):

$$\int_{VC} \frac{\delta \rho}{\delta t} dV' + \int_{SC} \rho(V \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

ρ = massa específica;

t = tempo;

V' = volume;

V = função velocidade;

\vec{n} = vetor unitário normal à superfície de controle;

A = elemento de área da superfície de controle.

Para o caso de regime permanente e de fluido considerado incompressível não há variação da massa contida no volume de controle em função do tempo, nem da massa específica em função da posição. Então, a equação da continuidade pode ser escrita como (WHITE, 2011, p. 162):

$$(VA)_{entra} = (VA)_{sai} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

V = velocidade média na seção;

A = área da seção transversal ao escoamento, de entrada e saída do volume de controle;

3.3.2 Equação da Quantidade de Movimento

A equação da quantidade de movimento nada mais é do que a aplicação da segunda lei de Newton a um fluido. Streeter e Wylie (1982, p. 115) concluem que “[...] a força resultante que age num volume de controle é igual à taxa de variação, com o tempo, da quantidade de movimento do volume de controle, mais o saldo dos fluxos da quantidade de movimento através da superfície de controle.”.

Expressando matematicamente, resulta em (STREETER; WYLIE, 1982, p. 115):

$$\sum F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho V dV' + \int_{SC} \rho V (V \cdot n) dA \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

ρ = massa específica;

t = tempo;

V' = volume;

V = velocidade do escoamento;

n = vetor unitário normal;

A = área da seção.

3.3.3 Equação de Bernoulli

A equação ou soma de Bernoulli foi estabelecida em 1738, pelo matemático holandês Daniel Bernoulli (WHITE, 2011). Baptista et al. (2001, p. 39) indicam: “A equação de Bernoulli é um caso particular da Primeira Lei da Termodinâmica. Esta lei estabelece que a mudança de energia interna de um sistema é igual à soma da energia adicionada ao fluido com o trabalho realizado pelo fluido.”.

Assumindo as hipóteses de:

- a) o escoamento ser permanente, não havendo variação da velocidade em função do tempo;
- b) se tratar de um fluido incompressível, no qual não há variação da massa específica;

- c) não haver efeito da viscosidade, ou seja, não há perda de carga entre dois pontos ao longo do trecho considerado de escoamento.

A equação pode ser escrita como (NETTO et al., 1998, p. 54):

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{constante} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

z = cota;

p = pressão;

γ = peso específico (ρg);

V = velocidade do escoamento;

g = aceleração da gravidade.

Mas, Crane Co. (1982, p. 5, tradução nossa), ressalva que “[...] na prática perdas ou aumento de energia [devido a bombas], são encontradas e devem ser incluídas na equação de Bernoulli.”. O balanço de energia entre dois pontos no fluido é dado por:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + EB = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

z = cota;

p = pressão;

ρ = massa específica;

V = velocidade do escoamento;

g = aceleração da gravidade;

ΔH = perda de carga total;

EB = energia aplicada (bomba) ou retirada (turbina) por alguma máquina.

3.4 PERDA DE CARGA LINEAR

A perda de carga ocorrida ao longo de um trecho qualquer de tubulação, que tenha dimensões constantes na seção transversal ao escoamento, pode ser considerada uniforme ao longo de seu comprimento e é denominada de perda de carga linear, distribuída ou contínua. A dificuldade de uma abordagem analítica do problema fomentou a geração de inúmeras fórmulas empíricas para sua determinação (NETTO et al., 1998). Porém Gomes (2004, p. 36) alerta:

[...] são muito conhecidas as fórmulas empíricas de Manning, [a equação de Darcy-Weisbach, apesar de haver necessidade de determinação empírica para o fator de atrito, foi desenvolvida racionalmente] Hazen-Williams, Flamant, Sciemeni, Scobey entre outras. A seleção da fórmula ou equação empírica mais adequada, dentre as existentes, depende da semelhança entre as condições hidráulicas do dimensionamento em questão, com as condições hidráulicas utilizadas no desenvolvimento da fórmula. No entanto as duas fórmulas largamente utilizadas pelos projetistas são as de Darcy-Weisbach e a de Hazen-Williams.

3.4.1 Equação de Darcy-Weisbach

A equação de Darcy-Weisbach, de 1850, ou fórmula universal de perda de carga, de acordo com Crane Co. (1982, p. 6, tradução nossa), “[...] pode ser racionalmente deduzida [a partir das equações básicas da hidrodinâmica (mostradas anteriormente) e] por análise dimensional, com exceção do fator de [perda de carga] f , que deve ser experimentalmente determinado.”, e é escrita, para condutos com seções transversais circulares, segundo Gomes (2004, p. 38), como:

$$hl = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

hl = perda de carga linear;

f = fator de perda de carga de Darcy;

L = comprimento do conduto;

V = velocidade do escoamento;

g = aceleração da gravidade;

D = diâmetro do conduto.

Maestri et al. (2008, p. 3.3), acrescentam:

A equação de Darcy-Weisbach foi deduzida sem a imposição de restrição ao tipo de escoamento, logo ela é uma equação geral com a qual se pode calcular as perdas de carga lineares nos condutos tanto em regime laminar quanto turbulento. A estrutura da fórmula continua válida nestes dois regimes, entretanto a determinação do fator de perda de carga 'f' é que deverá ser modificada para contemplar esses dois tipos de escoamento.

3.4.1.1 Fator de Perda de Carga para Escoamentos Laminares

Para o regime laminar ($Re < 2000$), o “[...] que se verifica é tão somente uma deformação contínua da massa fluida, sendo a viscosidade ou atrito interno do fluido responsável pela perda de carga.” (NETTO et al., 1998, p. 161).

No caso de escoamento laminar a equação a ser utilizada é a de Hagen-Poiseuille (WHITE, 2011, p. 363):

$$hl = \frac{128vLQ}{\pi D^4 g} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

hl = perda de carga linear;

v = viscosidade cinemática;

L = comprimento do conduto;

Q = vazão volumétrica;

g = aceleração da gravidade;

D = diâmetro do conduto.

Comparando as fórmulas 7 e 8 obtém-se para o fator de Darcy (WHITE, 2011, p. 363):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

f = fator de atrito;

Re = número de Reynolds.

3.4.1.2 Fator de Perda de Carga para Escoamentos Turbulentos

Em escoamentos turbulentos ($Re > 4000$), que Gomes (2004) afirma serem os tipos mais frequentes na engenharia, “[...] a resistência é o efeito combinado das forças devidas à viscosidade e à inércia. Nesse caso, a distribuição de velocidades na canalização depende da turbulência, maior ou menor, e esta é influenciada pelas condições das paredes.” (NETTO et al., 1998, p. 115). Porém, se as rugosidades forem muito menores do que a subcamada viscosa, essas não influenciam na perda de carga, lembrando que a subcamada viscosa é a região (junto à fronteira sólida do escoamento) na qual as forças de viscosidade são mais importantes que as de inércia (WHITE, 2011). Nesse caso, o escoamento é denominado turbulento liso e o fator de atrito pode ser calculado pela equação de Nikuradse (BAPTISTA et al., 2001, p. 86):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{Re \sqrt{f}}{2,51} \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

f = fator de atrito;

Re = número de Reynolds.

No entanto, Netto et al. (1998, p. 163) complementam:

Quando as superfícies são de tal forma rugosas que apresentam protuberâncias que ultrapassam o filme laminar e se projetam na zona turbulenta, elas provocam o aumento desta, resultando daí uma perda mais elevada para o escoamento.

Esse tipo de escoamento é nomeado de turbulento rugoso, nele, o número de Reynolds e, portanto, a velocidade já não influencia no fator de atrito. Sendo esse possível de ser expresso através da equação (10) de Nikuradse (BAPTISTA et al., 2001, p. 86):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3,7D}{e} \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

f = fator de atrito;

e = rugosidade;

D = diâmetro do conduto.

Para a faixa de transição entre o regime turbulento e liso, segundo White (2011, p. 375):

Em 1939, buscando cobrir a faixa de rugosidade transicional, Colebrook combinou as relações para parede lisa e escoamento totalmente rugoso em uma engenhosa fórmula de interpolação. [Essa formula também é aplicável no caso de regime turbulento rugoso e turbulento liso].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{e}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (\text{fórmula 13})$$

Onde

f = fator de atrito;

e = rugosidade ;

D = diâmetro do conduto.

Re = número de Reynolds.

A tabela 4 fornece valores de rugosidade para tubos de diferentes materiais e diferentes estados.

Tabela 4 – Rugosidade dos tubos (valores de em metros)

Material	Tubos Novos	Tubos Velhos
Aço galvanizado	0,00015 a 0,0002	0,0046
Aço rebitado	0,001 a 0,003	0,006
Aço revestido	0,0004	0,0005 a 0,0012
Aço soldado	0,00004 a 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento-amianto	0,000025	
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 a 0,001	
Concreto ordinário	0,001 a 0,002	
Ferro forjado	0,0004 a 0,0006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 a 0,0005	0,003 a 0,005
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,00012	0,0021
Madeira em aduelas	0,0002 a 0,001	
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,003
Vidro	lisos	lisos
Plastico	lisos	lisos

(fonte: NETTO et al., 1998, p. 172)

3.4.2 Fórmula de Hazen-Williams

A fórmula de Hazen-Williams, de 1903, para cálculo de perda de carga linear foi desenvolvida através de um estudo criterioso no qual foram considerados dados experimentais obtidos anteriormente por diversos pesquisadores. Assim como qualquer fórmula empírica, a fórmula de Hazen-Williams deve ser utilizada somente em condições semelhantes às dos experimentos da qual a equação proveio, tendo como limites, diâmetros entre 50 mm e 3500 mm e velocidade que não ultrapassem os 3 m/s (NETTO et al., 1998, p. 149):

$$hl = 10,66 \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

hl = perda de carga linear ao longo do conduto;

L = comprimento do conduto;

Q = vazão volumétrica;

C = coeficiente de rugosidade que depende da natureza (material e estado) das paredes do tubo;

D = diâmetro do conduto.

Pela equação de Hazen-Williams não ser dimensionalmente homogênea, os coeficientes de rugosidade C, variam em função do sistema de unidade utilizado. A tabela 2 indica esse coeficiente para diversos materiais e estados de tubulações no sistema internacional de unidades (SI).

Tabela 5 – Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams

Tubos	Novos	Usados +/- 10 anos	Usados +/- 20 anos
Aço Corrugado (chapa ondulada)	60	x	x
Aço galvanizado roscado	125	100	x
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	x	x
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento argamassa	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Plástico(PVC)	140	135	130

(fonte: NETTO et al., 1998, p. 150)

3.4.3 Comparação Entre Métodos

A escolha da forma de cálculo da perda de carga cabe exclusivamente ao projetista. Streeter e Wylie (1982, p. 435) aconselham:

[...] as duas formulações de Darcy-Weisbach e de Hazen-Williams para cálculo das perdas numa tubulação são significativamente diferentes. A equação de Darcy Weisbach, que provavelmente tem maior base racional do que outras formulações exponenciais empíricas, tem recebido ampla aceitação. Contudo, quando se dispõe de dados experimentais específicos, [algo que na prática é raro], e se deduz uma fórmula exponencial baseada nesses dados, ela é preferível à abordagem mais geral do diagrama de Moody. Os dados devem ser confiáveis e a equação pode ser considerada válida somente dentro da faixa coberta pelos dados coletados.

Gomes (2004, p. 40) complementa:

Pode-se considerar que a fórmula de Darcy-Weisbach é a mais aconselhável para a determinação de perdas ao longo dos condutos, já que ela pode ser empregada para qualquer tipo de líquido, materiais e estado das tubulações, desde que seja determinado corretamente o valor do fator de atrito “f”. [...] Em projetos de adutoras e de redes de abastecimento a precisão que se pode ganhar com o emprego da fórmula de Darcy-Weisbach, frente às demais, será diluída com a imprecisão na obtenção da rugosidade dos tubos, já que não se pode garantir uma adequada uniformidade e precisão de fabricação das paredes internas dos diferentes tubos disponíveis no mercado.

3.5 PERDA DE CARGA SINGULAR

A perda de carga ocorrida devido a qualquer impedimento na tubulação que modifique as características do escoamento normal, como um todo, ou mesmo uma parte, é conhecida como perda de carga singular ou localizada. São responsáveis por esse fenômeno peças como: curvas, cotovelos, juntas, válvulas. A queda de energia nelas gerada é maior do que em trechos contínuos de tubulação devido ao aumento da turbulência (CRANE CO., 1982). Devido à dificuldade da análise do escoamento em singularidades, os métodos de cálculo de perda localizada são realizados empiricamente (WHITE, 2011). Ensaios realizados comprovam que (CRANE CO., 1982, p. 9, tradução nossa)

[...] a perda de carga devido a válvulas ou reduções é proporcional a uma potência constante da velocidade. Quando uma queda de pressão é plotada em função da velocidade em coordenadas logarítmicas, a curva resultante é uma linha reta. Em um regime turbulento o valor do expoente da velocidade varia de 1,8 a 2,1 para diferentes modelos de válvulas e reduções. Entretanto, para fins práticos, é possível assumir que a perda de carga em escoamento turbulento seja proporcional ao quadrado da velocidade.

Porém, a fim de facilitar os cálculos, Streeter e Wylie (1982, p. 259) esclarecem que: “Em geral as perdas singulares podem ser desprezadas quando, em média, existe um comprimento de 1000 diâmetros entre duas singularidades.”. Outra forma de tornar os cálculos menos laboriosos é tomar como perda de carga localizada uma porcentagem da perda de carga contínua, evitando assim a necessidade de contagem de peças especiais trecho por trecho (GOMES, 2004, p. 41). No caso da rede de tubulações do Lenhs, por ter grande quantidade de singularidades em relação ao comprimento de tubulação, a perda por elas gerada é significativa e é separadamente calculada.

3.5.1 Método dos Coeficientes K

No método dos coeficientes K, “A perda de carga localizada ‘ Δh_s ’ em uma singularidade, ou peça especial do conduto, pode ser avaliada como uma porcentagem da carga cinética ($V^2/2g$), existente imediatamente a jusante do ponto onde se produz a perda.” (GOMES, 2004, p. 40):

$$\Delta h_s = K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

h_s = perda de carga singular;

K = coeficiente de perda de carga;

V = velocidade média;

g = aceleração da gravidade.

O coeficiente K é determinado experimentalmente e seu valor varia segundo o tipo e diâmetro da peça especial e “[...] é considerado independente do fator de atrito ou do número de Reynolds, e deve ser tratado como constante para qualquer forma de obstrução em todos os tipos de escoamento, incluindo laminar.” (CRANE CO., 1982, p. 10, tradução nossa). A tabela 6 indica valores aproximados de K .

Tabela 6 – Valores aproximados do coeficiente de perda de carga singular

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução Gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Saída de Canalização	1,00
Cotovelo de 90°	0,90	Tê, passagem direta	0,60
Cotovelo de 45°	0,40	Tê, saída bilateral	1,30
Crivo	0,75	Tê, saída de lado	1,80
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Curva de 45°	0,20	Válvula gaveta aberta	0,20
Curva de 22,5°	0,10	Válvula-de-pé	1,75
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula de retenção	2,50
Entrada de borda	1,00	Válvula globo aberta	10,00
Existência de pequena derivação	0,03	Velocidade	1,00

*Com base na velocidade maior

**Relativa à velocidade na canalização

(fonte: NETTO et al., 1998, p. 122)

3.5.2 Método dos Comprimentos Equivalentes

Outra forma de estimar a perda localizada é somar ao comprimento da tubulação um comprimento fictício, de mesmo diâmetro, que produza uma perda por atrito igual à verificada devido à singularidade (GOMES, 2004). Então, basta aplicar as fórmulas de cálculo de perda de carga linear ao comprimento total, real e virtual (em consequência das singularidades).

Ao contrário do método dos coeficientes K, no qual, o valor é considerado constante para todos os diâmetros, no método dos comprimentos equivalentes o comprimento virtual varia. A tabela 7 apresenta comprimentos equivalentes para singularidades de uso corriqueiro em redes de distribuição de água expressa em diâmetros da canalização na qual estas estão instaladas.

Tabela 7 – Perdas localizadas expressas em comprimento equivalente a diâmetros de canalização retilínea

Peça	Comprimentos expressos em diâmetros
Ampliação gradual	12
Cotovelo de 90°	45
Cotovelo de 45°	20
Curva de 90°	30
Curva de 45°	15
Entrada normal em canalização	17
Entrada de borda	35
Junção	30
Redução gradual	6
Registro de gaveta aberto	8
Registro de globo aberto	350
Registro de ângulo aberto	170
Saída de canalização	35
Tê, passagem direta	20
Tê, saída bilateral	65
Tê, saída de lado	50
Válvula-de-pé	250
Válvula de retenção	100

(fonte: NETTO et al., 1998, p. 129)

4 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição é parte fundamental do sistema de abastecimento de água tratada, cabendo a ela garantir a disponibilidade de água em vazão e pressão suficientes sem haver deterioração da qualidade ao longo do percurso. É dela a função de ligar os reservatórios de distribuição aos pontos de demanda (ligações domiciliares, hidrantes contra incêndio e demais pontos de tomada de água) (GOMES, 2004, p. 30). Componentes básicos de redes de abastecimento são trechos de tubo, juntas, válvulas e registros, todos esses de extrema importância para a operação e devem ser corretamente analisados sob o ponto de vista hidráulico. De acordo com Tsutiya (2006, p. 349), a rede de distribuição é “[...] em geral, o componente de maior custo do sistema de abastecimento de água, compreendendo, cerca de 50% a 75% do custo total de todas as obras do abastecimento.”.

A criteriosa análise da perda de carga em redes se faz necessária tanto por motivos econômicos, como escolha do diâmetro ideal, que não seja tão pequeno a ponto de causar uma demanda excessiva de energia para o bombeamento, e nem grande de modo a gerar custos altos com tubos e escavação, quanto por motivos hidráulicos, afim de que haja disponibilidade de água ininterrupta. Entretanto, as fórmulas de cálculo, mostradas nos itens 3.4.1 e 3.4.2 foram desenvolvidas para serem aplicadas em tubulações que vão de um ponto a outro levando uma vazão constante sem variação de diâmetro e rugosidade. No caso das redes são aplicados métodos diferentes em função, principalmente, do tipo de traçado, mas que tem como base teórica aquelas equações previamente descritas. Adiante é mostrado, para cada tipo de traçado, o método a ser utilizado.

4.1 REDES EM SÉRIE

É chamada de rede em série, de acordo com Streeter e Wylie (1982, p. 442), “[...] quando dois condutos de tamanhos ou rugosidades diferentes são ligados de modo que o fluido escoe por um e depois pelo outro [...]”. Nesse caso “[...] as perdas de carga em cada trecho de tubo são diferentes, mas a perda de carga total é igual à soma das perdas de carga de cada trecho ou tubo.” (NETTO et al., 1998, p. 345).

4.2 REDES EM PARALELO

Redes em paralelo ou em derivação são, segundo Streeter e Wylie (1982, p. 445), “Uma combinação de dois ou mais tubos ligados [...] de modo que o escoamento seja dividido entre os tubos e a seguir novamente unificado [...]. [Nos] tubos em paralelo, as perdas de carga são as mesmas em todos os condutos e as vazões são somadas.”.

Ou seja, a água se divide de forma a manter a perda de carga igual em cada conduto. Garantindo assim que a pressão no ponto de unificação seja igual para todos os trechos

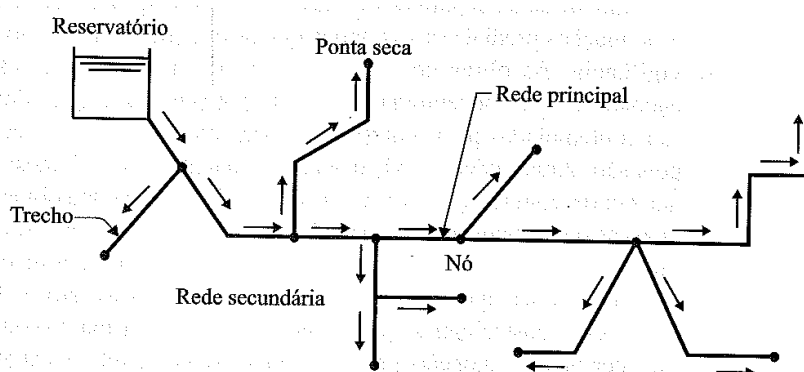
4.3 REDES RAMIFICADAS

As redes ramificadas caracterizam-se por (GOMES, 2004, p. 31):

[...] apresentarem um único sentido para o escoamento. A principal vantagem desta rede é que o custo de implantação é mais barato que o de uma rede malhada de mesmo porte. No entanto, as redes ramificadas apresentam inconvenientes na manutenção, visto que para se executar um reparo no trecho, todo o ramal a jusante ficará sem água. Desta forma, o emprego deste tipo de rede tem sido descartado em locais onde o abastecimento de água não deve sofrer paralisação, como nos centros urbanos de médio e grande porte.

Em redes ramificadas, o abastecimento ocorre em marcha, o que significa que “[...] existem diversas derivações ao longo do percurso onde a água vai sendo consumida e de cada um desses pontos para jusante a vazão é menor que anteriormente.” (NETTO et al., 1998, p. 355). Sendo assim, para o cálculo de rede ramificada, tendo em vista que o sentido do escoamento é determinado pelo próprio arranjo de tubulações, basta uma simples acumulação de vazões de jusante para montante, tornando possível o conhecimento da perda de carga em qualquer trecho. A figura 2 apresenta um exemplo de rede com este tipo de traçado

Figura 2 – Esquema de uma rede ramificada



(fonte: TSUTIYA, 2006, p. 390)

4.4 REDES MALHADAS

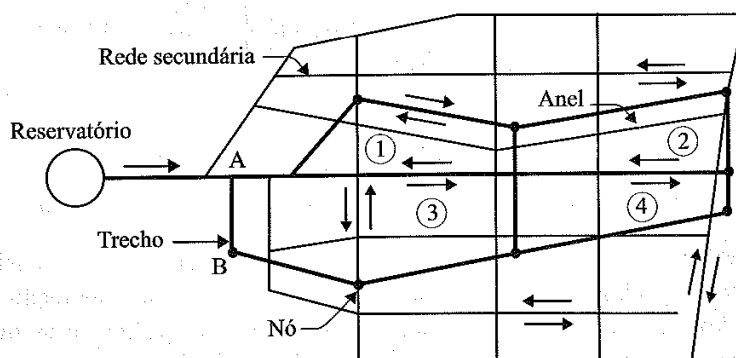
As redes malhadas são definidas por Tsutiya (2006, p. 391), como sendo constituídas de:

[...] tubulações principais que formam anéis ou blocos, de modo que, pode-se abastecer qualquer ponto do sistema por mais de um caminho, permitindo uma maior flexibilidade em satisfazer a demanda e manutenção da rede, com o mínimo de interrupção no fornecimento de água.

O sentido da vazão, devido à configuração da rede malhada, pode mudar em função da variação de demanda tornando assim o cálculo da perda de carga mais difícil (GOMES, 2004). A figura 3 representa um traçado típico de rede malhada. A resolução de redes desse tipo é análoga à de circuitos elétricos, porém os critérios que devem ser obedecidos, levando em conta que o consumo só ocorre nos nós, o que é a favor da segurança, pois não há uma gradual diminuição da velocidade gerando menor perda de carga, são (STREETTER; WYLIE, 1982):

- a) a soma algébrica das sucessivas perdas de carga em cada malha deve ser nula, levando em conta se essa perda é considerada positiva ou negativa em função do sentido arbitrado das vazões;
- b) a vazão que chega a um nó deve, de acordo com a equação da continuidade, ser igual à que sai;
- c) a equação de Darcy-Weisbach ou Hazen-Williams deve ser satisfeita em cada conduto, ou seja, uma relação entre vazão e perda de carga deve existir.

Figura 3 – Esquema de uma rede malhada



(fonte: TSUTIYA, 2006, p. 390)

4.5 MÉTODO DE HARDY-CROSS

Streeter e Wylie (1982, p. 450) explicam:

Como não é prático resolver problemas de redes analiticamente, utilizam-se métodos de aproximações sucessivas. O método de Hardy Cross admite vazões em cada conduto de modo que a equação da continuidade seja satisfeita em todos os nós. Calcula-se uma correção na vazão em cada malha em sequência até que se consiga um equilíbrio entre as malhas.

Netto et al. (1998, p. 496) reforçam:

O método de Cross é um processo iterativo de tentativas diretas; os ajustamentos feitos sobre os valores previamente admitidos ou adotados são computados e portanto, controlados. Nessas condições, a convergência dos erros é rápida, obtendo-se quase sempre uma precisão satisfatória nos resultados, após três tentativas apenas.

A sequência de cálculo de vazão, e por consequência perda de carga, pelo método de Hardy-Cross é descrita por Tsutiya (2006, p. 410):

- a) estabelecido o traçado dos anéis e pontos de carregamento das vazões, obtém-se os comprimentos dos trechos e suas cotas respectivas, pois supõem-se conhecida a topografia da área. Fixa um sentido positivo do escoamento;
- b) supõem-se conhecidos os pontos de entrada e saída de água e os valores das respectivas vazões;
- c) estabelece-se uma primeira distribuição de vazões, arbitrária, mas orientada em cada trecho do anel, obedecendo-se em cada nó: $\sum Q=0$;
- d) admite-se um diâmetro para cada trecho do anel, com base em velocidades limites;
- e) para cada trecho de cada anel, calculam-se as perdas de carga com seus respectivos sinais, positivo ou negativo, e faz-se o somatório das perdas de carga

em todos os anéis. Se todos os anéis tiverem $\sum \Delta H = 0$, a distribuição de vazões estabelecidas está correta e a rede é dita equilibrada;

- f) a rede não estará equilibrada, se pelo menos um dos anéis tiver $\sum \Delta H \neq 0$. Neste caso, a vazão admitida deverá ser corrigida, somando-se algebricamente um valor de correção ΔQ , à vazão de cada trecho. O valor ΔQ é calculado da forma a seguir: [Utilizando a fórmula de Hazen Williams para perda de carga e admitindo que o valor de ΔQ é muito menor do que Q]
$$\Delta Q = - \frac{\sum \Delta H}{\sum \frac{1.85 \Delta H}{Q}}$$
- g) com as novas vazões obtidas em cada anel, recalculam-se as perdas de carga e prossegue-se com o método até que se obtenham, em todos os anéis, valores de ΔQ pequenos ou nulos.

As perdas singulares são incluídas na forma de comprimentos equivalentes. Caso dentro do circuito haja uma bomba é necessário considerá-la como uma "perda de carga negativa".

4.6 EPANET

A modelagem hidráulica de redes de abastecimento nada mais é do que uma modelagem numérica que represente, com base em conceitos físicos, o sistema a ser analisado. Sendo utilizada quando não é prática a determinação das características do sistema real ou na avaliação de sistemas antes de sua implantação. Nesse processo são feitas simplificações que resultam em um conjunto de equações que governam o modelo, simplificações essas acarretam erros, que com o auxílio ensaios experimentais podem ser quantificados (WALSKI et al, 2001).

As várias aplicações do programa, dimensionamento de redes de abastecimento de água e irrigação, otimização da operação de reservatórios, análise da eficiência energética de sistemas de abastecimento, além da capacidade de simulações de qualidade da água, fazem com que o Epanet, mesmo passados mais de vinte anos de seu lançamento, ainda mantenha a sólida reputação.

Há no mercado diversos softwares para dimensionamento e análise de sistemas de abastecimento. Esse trabalho restringe-se ao modelo EPANET que, segundo Gomes (2004, p. 181), “[...] se destaca por sua qualidade e pela quantidade de usuários existentes em muitos países.”.

O EPANET é (GOMES, 2004, p. 181):

[...] um programa de informática que permite simular o comportamento hidráulico de um sistema pressurizado de distribuição de água, ao longo do tempo [ou de forma estática]. O sistema pode ser composto por uma rede de tubulações (malhada ou ramificada), estações de bombeamento, diversos tipos de válvulas e reservatórios de nível fixo e/ou variável. O EPANET também simula o comportamento de parâmetros de qualidade da água [...]

Esse software foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U. S. Environmental Protection Agency – EPA*). É de domínio público, portanto é disponibilizado livremente para qualquer usuário, roda em ambiente Windows e não requer grandes requisitos do computador.

O programa permite a obtenção de valores de vazão em cada trecho e pressão em cada nó e tem, de acordo com Gomes (2004, p. 182), entre as características mais destacáveis para modelação hidráulica:

- a) não existe limite no número de componentes da rede a analisar;
- b) calcula as perdas de carga por atrito através das fórmulas de Hazen-Williams, Darcy Weisbach ou Chezy-Manning;
- c) inclui as perdas de carga singulares em curvas, ampliações, reduções, etc.;
- d) simula bombas, funcionando com velocidade de rotação fixa ou variável;
- e) calcula a energia de bombeamento e o seu respectivo custo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo a estrutura utilizada para a aquisição dos dados experimentais, a modelagem hidráulica no programa EPANET e as características dos ensaios realizados e suas análises são descritas. Ainda são identificados os equipamentos e materiais componentes da rede de distribuição do Lenhs, parâmetros essenciais para as simulações hidráulicas que visam a determinação de perda de carga.

5.1 LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM SANEAMENTO

O Lenhs do Instituto de Pesquisas Hidráulicas faz parte de uma rede de laboratórios localizados em universidades selecionadas de todo o Brasil a fim de gerar e compartilhar conhecimento na área de eficiência energética em saneamento, Gomes (2005, p. 1) justifica a necessidade de estudos com esse foco, “O desperdício anual de energia elétrica em prestadores de serviço de saneamento é de 1,5 bilhões de kWh (ano base 2003), que corresponde a 0,5% do consumo de energia elétrica do país.”. Para tentar reduzir esses números o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), das Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás) concebeu a rede Lenhs.

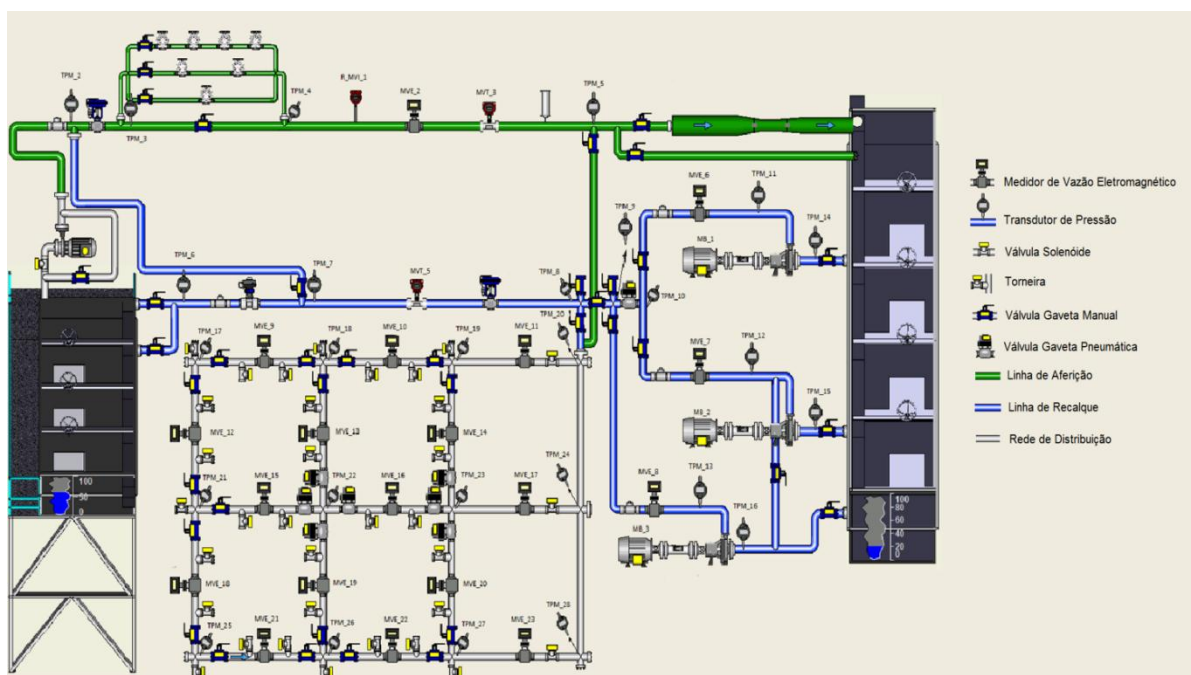
O Lenhs conta com ferramentas para a medição em campo assim como uma bancada fixa instalada no Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS. A bancada fixa pode ser dividida entre a bancada de aferição, que permite a calibração e verificação de equipamentos medidores de vazão de diferentes princípios de funcionamento, e a bancada que visa simular de maneira genérica um sistema de abastecimento de água, podendo esta ainda ser separada em bombeamento e recalque; parte constituída de conjuntos moto-bomba, tubulações de recalque e válvulas, e distribuição, parte alvo do trabalho, onde são feitos ensaios de diferentes cenários e condições de abastecimento. A figura 4 mostra a bancada fixa do Lenhs. Na figura 5 é possível ver, na tela do sistema supervisor, a separação entre a bancada de aferição, bombeamento e recalque e rede de distribuição além da identificação dos equipamentos utilizados para a operação e aquisição de dados.

Figura 4 – Vista geral da bancada fixa do
Laboratório de Eficiência Hidráulica e Energética



(fonte: foto do autor)

Figura 5 – Sistema supervisorio do Lenhs



(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS

A rede de distribuição analisada é formada por tubulações de aço carbono galvanizado *schedule 40* roscadas de diferentes diâmetros ligadas formando 6 anéis. Diferente de redes de abastecimento urbanas que possuem grandes extensões de tubulações com poucos acessórios

e muitas vezes nenhuma instrumentação, a rede do Lenhs conta com um grande número de singularidades e diversos medidores.

A adução de água no laboratório é feita a partir de três bombas KSB Meganorm 40-200 de 1750 rotações por minuto, que podem ser operadas individualmente ou em conjunto, associadas em paralelo, para que haja a soma das vazões ou em série, de modo que as pressões sejam somadas. Todas as bombas são acionadas através de inversores de frequência o que possibilita a variação da rotação da bomba o que modifica suas condições de trabalho (vazão e pressão). A figura 6 expõe o arranjo da estação elevatória do Lenhs.

Figura 6 – Estação de recalque do Lenhs

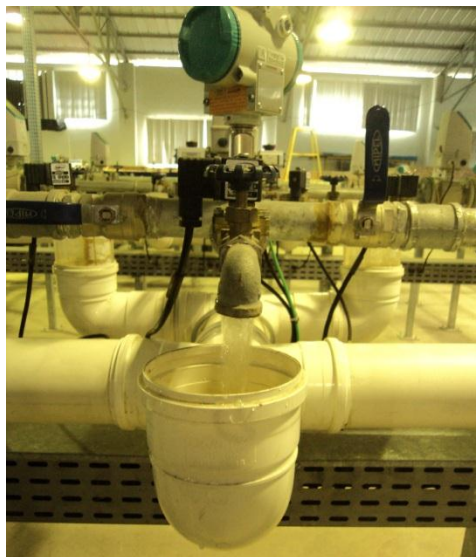


(fonte: foto do autor)

A fim de simular a demanda por parte dos usuários, há na rede trinta e uma torneiras instaladas nos nós de ligação entre os tubos. Pode-se controlar a abertura das torneiras tanto de maneira manual quanto de maneira automática, através de válvulas solenoides. O sistema ainda permite a programação para que as torneiras tenham seu estado alterado de maneira controlada caso certas condições de contorno definidas pelo usuário sejam alcançadas. Na

figura 7 está a imagem da torneira e do mecanismo elétrico que atua para abertura e fechamento.

Figura 7 – Torneira e mecanismo de abertura



(fonte: foto do autor)

Para possibilitar a entrada de água na malha de distribuição há três válvulas solenoides da marca Jefferson modelo 1342BA12 (figura 8) de acionamento elétrico, que segundo a fabricante apresenta o valor do coeficiente de perda de carga igual a 25 (JEFFERSON SOLENOIDBRAS LTDA, [201-]). As manobras realizadas dentro da rede de abastecimento podem ser executadas por válvulas esfera tanto manuais como acionadas por atuadores pneumáticos, que Netto et al. (1998, p. 245) caracteriza como sendo “[...] um dispositivo cilíndrico como se fosse um pedaço de tubo, com um eixo perpendicular ao cilindro/tubo, [...] [que] Na posição aberta tem perda de carga zero, pois como internamente é um tubo liso que se alinha com a tubulação onde se insere, não há perdas.”. A rede de distribuição do Lenhs conta com 17 válvulas esfera manuais, como apresentadas na figura 9, e 7 válvulas esfera que podem ser operadas remotamente (figura 10).

Figura 8 – Válvula solenoide Jefferson 1342BA12



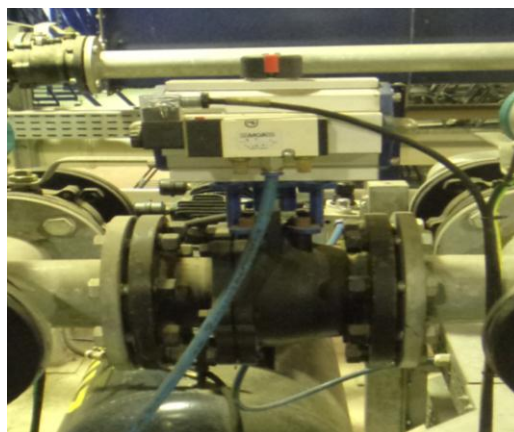
(fonte: foto do autor)

Figura 9 – Válvula esfera manual



(fonte: foto do autor)

Figura 10 – Válvula esfera com atuador pneumático



(fonte: foto do autor)

A aquisição de dados de vazão é feita por intermédio de medidores eletromagnéticos da marca Siemens modelo MagFlow 5100 que medem vazão pelo princípio da lei de Faraday. O fluido ao passar pelo campo magnético gerado pelas bobinas do instrumento cria uma corrente elétrica, como esta corrente é função da velocidade do escoamento, basta fazer uma calibração do aparelho receptor para que haja uma correta conversão de corrente elétrica para vazão. O medidor de vazão atua satisfatoriamente para velocidades entre 0.25 e 10 m/s com um erro máximo de 0,5% no valor da vazão. Como pode ser visto na figura 5 há medidores instalados em todos os trechos da rede de distribuição onde há consumo, o que confere grande facilidade na determinação da vazão consumida em cada nó, por meio do equilíbrio das vazões que entram e saem em cada um deles. Este equipamento além de determinar a grandeza da vazão

possibilita também o conhecimento do sentido do fluxo, o que, para escoamento em redes malhadas é imprescindível. A figura 11 retrata o medidor de vazão e sua instalação.

Figura 11 – Medidor de vazão eletromagnético



(fonte: foto do autor)

Transdutores piezoresistivos do modelo SITRANS P instalados nos nós da rede de distribuição, diretamente sobre as cruzetas, são os responsáveis pela medição de pressão. Transdutores são equipamentos que transformam grandezas físicas em sinais elétricos, no caso de transdutores de pressão, uma membrana sujeita à força exercida pelo fluido sofre uma deflexão e esta gera uma variação na resistência elétrica do circuito. O aparelho receptor converte, após prévia calibração, esse sinal elétrico em grandeza física. O instrumento atua em faixas de pressão de 1,63 mca a 163,15 mca, com uma precisão de 0,02 mca. Na figura 12 está exposto um dos transdutores em operação.

Figura 12 – Transdutor de pressão

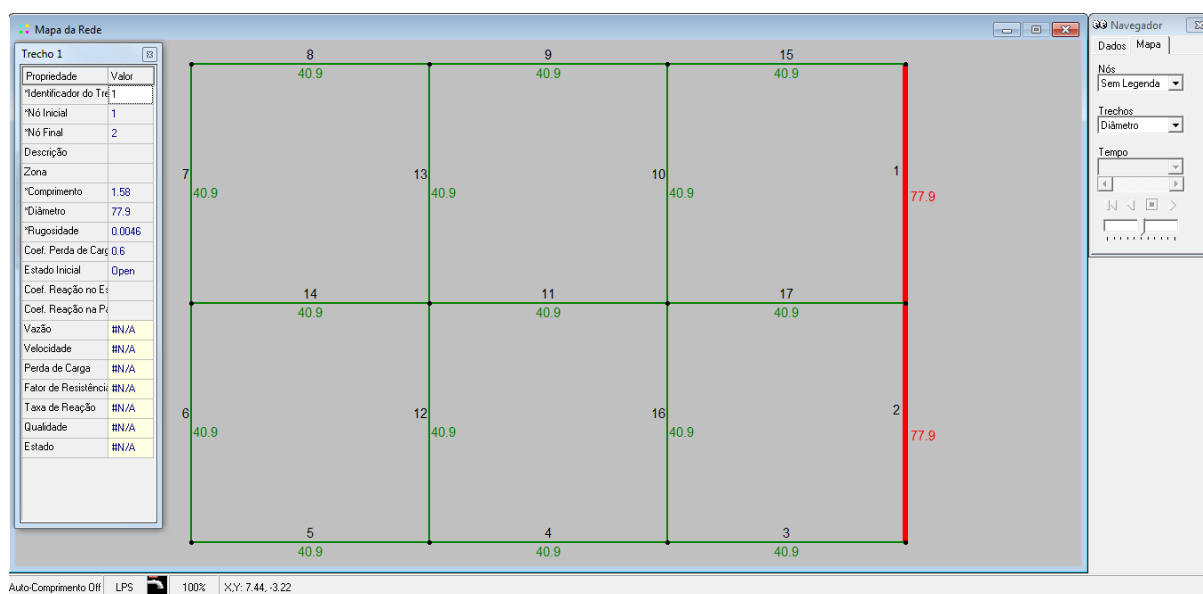


(fonte: foto do autor)

5.3 MODELAGEM NUMÉRICA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO LENHS

Para executar uma simulação numérica no EPANET é necessário primeiramente traçar o caminhamento das tubulações para então inserir as propriedades tanto dos trechos como dos nós. Na rede de distribuição do Lenhs os tubos instalados possuem dois diâmetros diferentes, três polegadas e uma polegada e meia, o que corresponde a um diâmetro interno de 40,9mm e 77,9mm. O método utilizado para cálculo da perda de carga linear foi o de Darcy-Weisbach por possuir uma fundamentação mais racional e possibilitar a consideração de parâmetros que são inexistentes em métodos empíricos, como o de Hazen-Williams, que, no caso da rede de distribuição do Lenhs, não pode ser aplicado devido à restrição de diâmetro mínimo já apresentada no item 3.4.2. Todos os parâmetros hidráulicos necessários para o cálculo precisam ser introduzidos pelo usuário, devido ao fato do software não contar com valores preestabelecidos para diferentes tipos de tubulações e singularidades. A rugosidade adotada é a sugerida pela tabela 4 para tubulações de aço galvanizado antigo, 0,0046 metro, esse valor se justifica devido ao estado de conservação dos tubos já bastante deteriorados, característica comum em tubos de aço galvanizado. Para o comprimento foram feitas medições das distâncias entre os nós e descontados os comprimentos das válvulas e acessórios, pois esse já é considerado no coeficiente de perda de carga singular. A figura 13 exibe a rede do Lenhs representada no EPANET com os diâmetros internos e identificadores dos trechos indicados além da janela de inserção de dados nas tubulações.

Figura 13 – Rede de distribuição do Lenhs modelada no software EPANET



(fonte: imagem obtida pelo autor)

Na simulação, o coeficiente de perda de carga singular deve ser definido para cada trecho, ou seja, em cada tubulação devem ser somados os valores dos coeficientes das singularidades nele instalada. Primeiramente foram adotados os parâmetros sugeridos pela tabela 5. No caso de tê, por terem o valor de K variável conforme o comportamento do escoamento em seu interior, o coeficiente foi arbitrado para cada percurso diferente. A tabela 8 exhibe a relação de peças por trecho e suas características.

Tabela 8 – Relação das singularidades e características geométricas de cada trecho

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Singularidades	Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Singularidades
1	77,9	1,58	Tê	10	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
2	77,9	1,58	Tê	11	40,9	1,03	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
3	40,9	1,33	Tê, Redução Gradual, Válvula 1342BA12,	12	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
4	40,9	1,03	3 Tês, 2 Válvulas Esfera	13	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
5	40,9	1,03	3 Tês, 2 Válvulas Esfera	14	40,9	1,03	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
6	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera	15	40,9	1,33	Tê, Redução Gradual, Válvula 1342BA12,
7	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera	16	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
8	40,9	1,03	3 Tês, 2 Válvulas Esfera	17	40,9	1,33	Tê, Redução Gradual, Válvula 1342BA12,
9	40,9	1,03	3 Tês, 2 Válvulas Esfera	18	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera
				19	40,9	1,33	3 Tês, 2 Válvulas Esfera

(fonte: elaborada pelo autor)

Nos nós é onde são informadas as vazões consumidas e cotas. Como a rede de distribuição do Lenhs está toda em mesmo nível, foi arbitrado o valor zero para cota. Para vazões consumidas foram inseridos os consumos de todas as torneiras adjacentes a cada nó, calculadas pela diferença entre as leituras de medidores de vazão dos trechos vizinhos.

Como o objetivo do trabalho é a determinação da perda de carga na tubulação e não há necessidade de avaliação das características do conjunto moto-bomba para seu cálculo. O programa permite uma simplificação na modelagem que gera considerável diminuição no trabalho de inserção dos dados. A introdução de um reservatório como fonte de água para a rede dispensa a exigência de geração de curvas de estrangulamento das bombas, que para operações com inversores de frequência é bastante laborioso tendo em vista que para cada frequência ensaiada seria necessária a mudança de curva. Para a cota do reservatório foi estipulada a pressão medida no primeiro transdutor da rede de distribuição e somada a carga cinética.

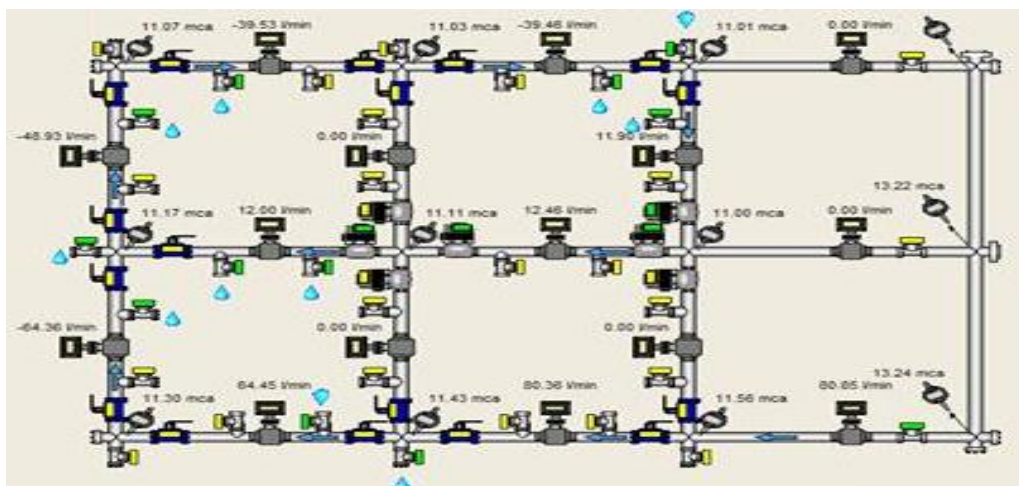
5.4 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios foram realizados na bancada fixa do Lenhs no primeiro semestre de 2013 e de 2014. Primeiramente foi feita uma avaliação preliminar para escolha dos percursos de abastecimento, tipo de operação das bombas e frequência de rotação das mesmas. Dentre os cenários analisados foram selecionados o abastecimento em marcha através de uma rede ramificada e de uma rede malhada com dois anéis. Para cada trajeto foram aduzidas cinco diferentes vazões: a menor foi obtida com uma bomba sendo operada individualmente com 80% de sua rotação nominal, as outras quatro vazões foram fruto da associação de duas bombas em série, cuja frequência de rotação foi variada de 70% a 100%. A duração de cada experimento foi de 4 minutos gerando uma série de 120 conjuntos de dados já que a aquisição de dados do Lenhs é feita a 0,5 Hertz.

5.4.1 Ensaio de Rede Ramificada

O percurso do ensaio de rede ramificada foi escolhido de forma a abranger o maior número de trechos possível, totalizando 11 trechos. Para tanto foram abertas onze torneiras distribuídas de maneira a simular o abastecimento em marcha o que viabiliza uma maior variabilidade nas vazões, já que após cada tomada de água há uma diminuição na vazão passante. A figura 14 apresenta o sistema supervisório do Lenhs durante o ensaio, as setas azuis indicam o sentido do escoamento e as torneiras que possuem uma gota de água ao lado são as abertas. Os valores numéricos são referentes ao ensaio com uma bomba operando individualmente.

Figura 14 – Percurso do ensaio de rede ramificada



(fonte: imagem obtida pelo autor)

As vazões ensaiadas, tomando como referência o medidor de vazão localizado mais próximo à bomba, as pressões, medidas na entrada da rede de distribuição e a rotação do eixo da bomba estão na tabela 9.

Tabela 9 – Resumo dos ensaios em rede ramificada

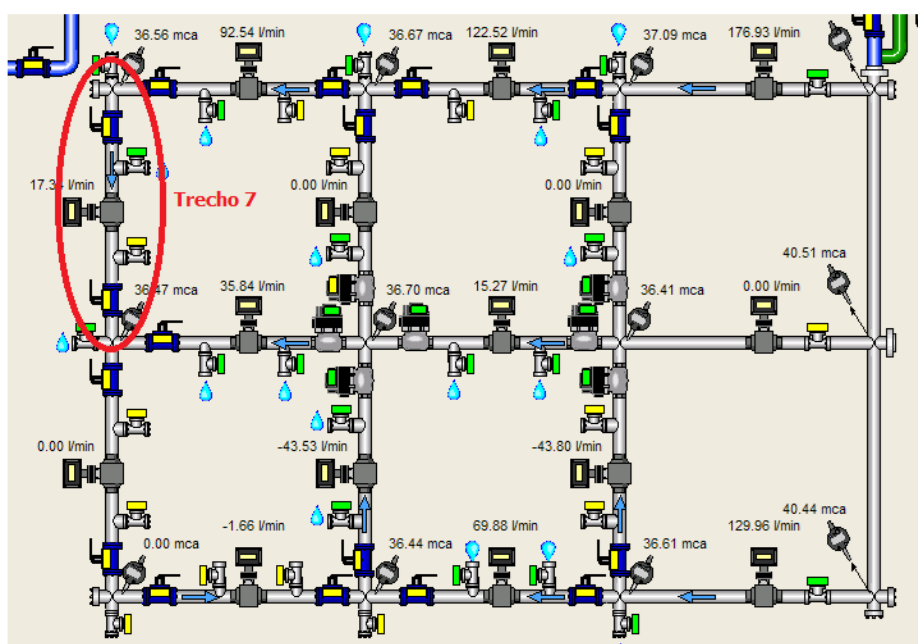
Ensaio	Número de Bombas	Rotação (rpm)	Vazão no Medidor de Referência (l/s)	Pressão no Transdutor de Referência (mca)
1	1	1400	1,31	13,28
2	2	1225	1,59	18,61
3	2	1400	2,08	28,20
4	2	1575	2,37	35,78
5	2	1750	2,76	43,98

(fonte: elaborada pelo autor)

5.4.2 Ensaio de Rede Malhada

No ensaio da rede malhada foi simulado um abastecimento em marcha através de dois anéis interligados. Foram abertas 16 torneiras distribuídas de maneira aleatória dentro da rede de distribuição. Verificou-se uma alteração no sentido do escoamento entre as três menores vazões e as duas maiores, tendo ocorrido uma inversão de fluxo no trecho sete. A figura 15 apresenta a imagem do sistema supervisorório referente ao ensaio das duas maiores vazões

Figura 15 – Percurso ensaiado para as duas maiores vazões da rede em malha



(fonte: imagem obtida pelo autor)

Na tabela 10 estão as vazões e pressões obtidas para cada frequência de rotação ensaiada, tomando como referência o medidor de vazão na saída da bomba e o medidor de pressão na entrada da rede de distribuição.

Tabela 10 – Resumo dos ensaios de rede malhada

Ensaio	Número de Bombas	Rotação (rpm)	Vazão no Medidor de Referência (l/s)	Pressão no Transdutor de Referência (mca)
1	1	1400	2,42	12,24
2	2	1225	3,41	20,04
3	2	1400	3,99	26,16
4	2	1575	4,56	33,06
5	2	1750	5,11	40,49

(fonte: elaborada pelo autor)

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são confrontados os dados adquiridos no modelo experimental com os obtidos no modelo numérico. A análise foi feita sobre a média das séries de dados experimentais, já que, como anteriormente relatado, o Lenhs gera uma série temporal de dados para cada experimento. A fórmula universal e o método dos coeficientes K foram os escolhidos para a validação do modelo matemático para cálculo, respectivamente, da perda de carga linear e singular.

5.5.1 Análise dos Resultados Obtidos na Rede Ramificada

A perda de carga obtida experimentalmente, por se tratar de uma rede instalada na mesma cota, é determinada pela simples subtração dos valores medidos no transdutor de montante e jusante de cada trecho, levando em conta as respectivas cargas cinéticas, pois o medidor de pressão utilizado somente mede a pressão estática. Já a vazão passante é o acúmulo dos consumos de cada nó, portanto a vazão simulada em cada trecho do modelo numérico é a mesma do modelo experimental, possibilitando que a comparação de perda de carga seja feita diretamente. A tabela 11 apresenta os principais resultados da análise da rede ramificada.

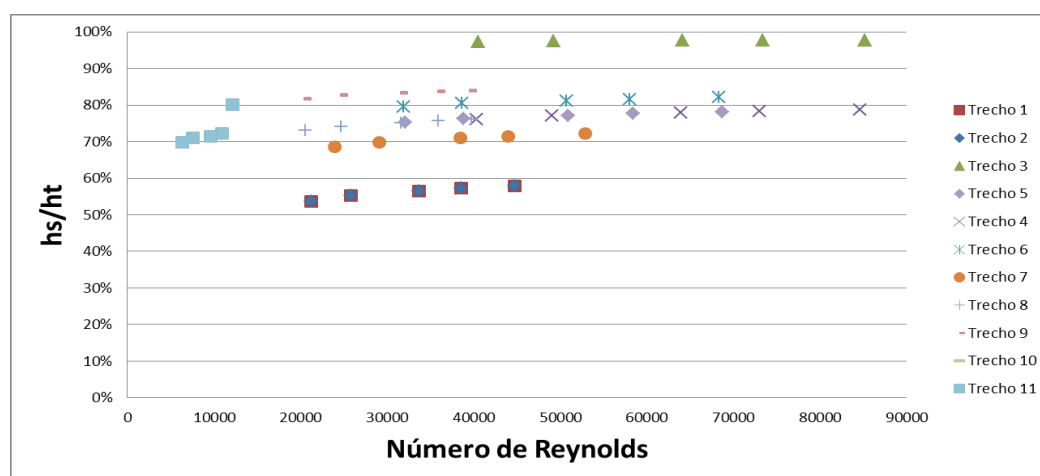
Tabela 11 – Dados medidos e calculados para a rede ramificada

Ensaio 1								
Trecho	K Recomendada pela Bibliografia	Vazão no Trecho	Vazão Consumida	Número de Reynolds	Pressão no Nó de Montante Obtida Experimentalmente	Pressão no Nó de Jusante Obtida Experimentalmente	Perda de Carga Medida	Perda de Carga Calculada
	[-]	(l/s)	(l/s)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
1	0,6	1,31	0,00	21250	13,28	13,27	0,01	0,00
2	0,6	1,31	0,00	21250	13,27	13,27	0,00	0,00
3	26,95	1,31	0,00	40474	13,32	11,76	1,56	1,40
4	1,8	1,30	0,00	40338	11,76	11,57	0,19	0,12
5	1,8	1,04	0,27	32043	11,55	11,41	0,14	0,08
6	3	1,03	0,01	31864	11,41	11,32	0,10	0,12
7	1,8	0,77	0,26	23925	11,30	11,21	0,09	0,05
8	1,8	0,67	0,11	20560	11,21	11,18	0,03	0,03
9	3	0,66	0,00	20488	11,18	11,14	0,04	0,05
10	1,8	0,20	0,46	6275	11,13	11,13	0,00	0,00
11	3	0,21	0,00	6370	11,13	11,24	-0,11	0,00
Ensaio 2								
Trecho	K Recomendada pela Bibliografia	Vazão no Trecho	Vazão Consumida	Número de Reynolds	Pressão no Nó de Montante Obtida Experimentalmente	Pressão no Nó de Jusante Obtida Experimentalmente	Perda de Carga Medida	Perda de Carga Calculada
	[-]	(l/s)	(l/s)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
1	0,6	1,59	0,00	25848	18,61	18,56	0,05	0,00
2	0,6	1,59	0,00	25848	18,56	18,56	0,00	0,01
3	26,95	1,59	0,00	49230	18,63	16,39	2,24	2,07
4	1,8	1,59	0,01	49052	16,39	16,10	0,28	0,17
5	1,8	1,26	0,33	38827	16,08	15,91	0,17	0,11
6	3	1,25	0,01	38636	15,91	15,72	0,18	0,17
7	1,8	0,94	0,31	29053	15,70	15,62	0,08	0,07
8	1,8	0,80	0,14	24675	15,62	15,55	0,07	0,05
9	3	0,80	0,00	24654	15,55	15,48	0,07	0,07
10	1,8	0,24	0,56	7469	15,46	15,45	0,01	0,00
11	3	0,24	0,00	7571	15,45	15,59	-0,14	0,01
Ensaio 3								
Trecho	K Recomendada pela Bibliografia	Vazão no Trecho	Vazão Consumida	Número de Reynolds	Pressão no Nó de Montante Obtida Experimentalmente	Pressão no Nó de Jusante Obtida Experimentalmente	Perda de Carga Medida	Perda de Carga Calculada
	[-]	(l/s)	(l/s)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
1	0,6	2,08	0,00	33690	28,21	28,19	0,02	0,00
2	0,6	2,08	0,00	33690	28,19	28,19	0,01	0,01
3	26,95	2,08	0,00	64167	28,30	25,68	2,62	3,52
4	1,8	2,07	0,01	63908	25,68	25,24	0,44	0,29
5	1,8	1,65	0,42	50957	25,19	24,97	0,23	0,19
6	3	1,64	0,01	50696	24,96	24,65	0,32	0,29
7	1,8	1,24	0,40	38466	24,61	24,49	0,12	0,12
8	1,8	1,02	0,22	31664	24,48	24,31	0,17	0,07
9	3	1,02	0,00	31609	24,31	24,22	0,09	0,11
10	1,8	0,31	0,72	9461	24,19	24,18	0,01	0,01
11	3	0,31	0,00	9559	24,18	24,33	-0,15	0,01
Ensaio 4								
Trecho	K Recomendada pela Bibliografia	Vazão no Trecho	Vazão Consumida	Número de Reynolds	Pressão no Nó de Montante Obtida Experimentalmente	Pressão no Nó de Jusante Obtida Experimentalmente	Perda de Carga Medida	Perda de Carga Calculada
	[-]	(l/s)	(l/s)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
1	0,6	2,37	0,00	38528	35,80	35,79	0,01	0,01
2	0,6	2,37	0,00	38528	35,79	35,78	0,01	0,01
3	26,95	2,37	0,00	73382	35,94	32,57	3,37	4,60
4	1,8	2,36	0,01	73025	32,56	32,02	0,54	0,38
5	1,8	1,89	0,47	58403	31,96	31,65	0,31	0,24
6	3	1,88	0,01	58057	31,65	31,22	0,43	0,38
7	1,8	1,42	0,45	44016	31,17	31,00	0,17	0,15
8	1,8	1,16	0,26	35935	30,98	30,77	0,21	0,10
9	3	1,16	0,00	35916	30,77	30,67	0,11	0,14
10	1,8	0,35	0,81	10721	30,63	30,62	0,01	0,01
11	3	0,35	0,00	10901	30,62	30,75	-0,13	0,01
Ensaio 5								
Trecho	K Recomendada pela Bibliografia	Vazão no Trecho	Vazão Consumida	Número de Reynolds	Pressão no Nó de Montante Obtida Experimentalmente	Pressão no Nó de Jusante Obtida Experimentalmente	Perda de Carga Medida	Perda de Carga Calculada
	[-]	(l/s)	(l/s)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	(mca)
1	0,6	2,76	0,00	44730	44,00	43,98	0,02	0,01
2	0,6	2,76	0,00	44730	43,98	43,98	0,00	0,02
3	26,95	2,76	0,00	85195	44,19	39,75	4,44	6,20
4	1,8	2,74	0,02	84685	39,75	38,99	0,76	0,51
5	1,8	2,22	0,52	68712	38,91	38,54	0,37	0,34
6	3	2,21	0,01	68302	38,54	37,91	0,63	0,53
7	1,8	1,71	0,50	52843	37,85	37,62	0,24	0,22
8	1,8	1,29	0,42	39743	37,58	37,33	0,25	0,12
9	3	1,28	0,00	39602	37,33	37,19	0,13	0,17
10	1,8	0,38	0,90	11867	37,15	37,14	0,01	0,01
11	3	0,38	0,00	12097	37,14	37,28	-0,14	0,02

(fonte: elaborada pelo autor)

Na tabela 11 a primeira coluna apresenta a identificação dos trechos conforme visto na figura 13, a coluna 2 demonstra os valores de K sugeridos pela bibliografia retirados da tabela 5, na coluna 3 estão as vazões medidas em cada trecho e, através da subtração dos valores de jusante dos de montante, foi definida a vazão consumida no nó final da trecho avaliado, valores esses apresentados na coluna 4. Nas colunas 6 e 7 estão valores de pressão adquiridos nos medidores de montante e jusante do Lenhs somados com a carga cinética, a coluna 8 apresenta a perda de carga medida, resultado da subtração dos valores nas colunas anteriores. A coluna 9 é resultado da perda de carga total, soma das perdas singular e localizada, calculadas com valores fornecidos pela bibliografia. Observando os valores de pressão obtidos na rede de distribuição do Lenhs, percebe-se primeiramente uma inconsistência na medição no transdutor de pressão situado a jusante do trecho 11, que indica que o escoamento desloca-se de um ponto de menor energia para um de maior, algo não factível. É possível ver que há uma diferença entre as perdas de carga medidas e calculadas, entretanto para facilitar a compreensão do comportamento dessa divergência e facilitar o entendimento por parte do leitor, fez-se uso de adimensionalizações que permitem uma generalização dos resultados obtidos. O principal adimensional utilizado foi o número de Reynolds, calculado para a temperatura do fluido estimada em 20 graus Celsius. Primeiramente foi avaliada a influência das singularidades sobre a perda de carga total, já que, diferente de redes de distribuição urbanas convencionais, no Lenhs há um grande número de acessórios por trecho, relativamente. A figura 16 apresenta a relação entre a perda de carga singular calculada através dos coeficientes apresentados na tabela 11 e a perda de carga total em cada trecho.

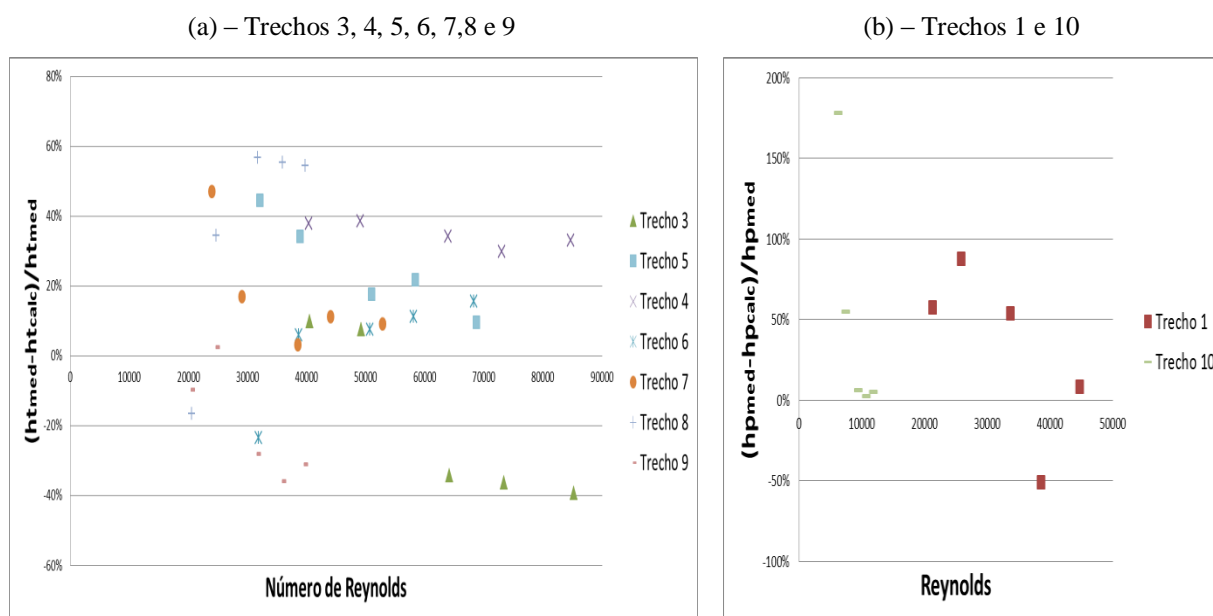
Figura 16 – Relação entre a perda de carga singular e a perda de carga total



(fonte: elaborada pelo autor)

Na figura anterior “hs” e “hl” representam respectivamente a perda de carga singular e perda de carga total calculadas para cada trecho. Nota-se que, como o esperado, a perda singular é preponderante na rede analisada e cresce conforme o aumento do número de Reynolds. A comparação entre os valores adquiridos no Lenhs e os obtidos no modelo EPANET está apresentada abaixo através da relação percentual calculada entre as perdas obtidas no modelo experimental (htmed) e numérico (htcalc).

Figura 17 – Diferença percentual entre a perda de carga medida e calculada



(fonte: elaborada pelo autor)

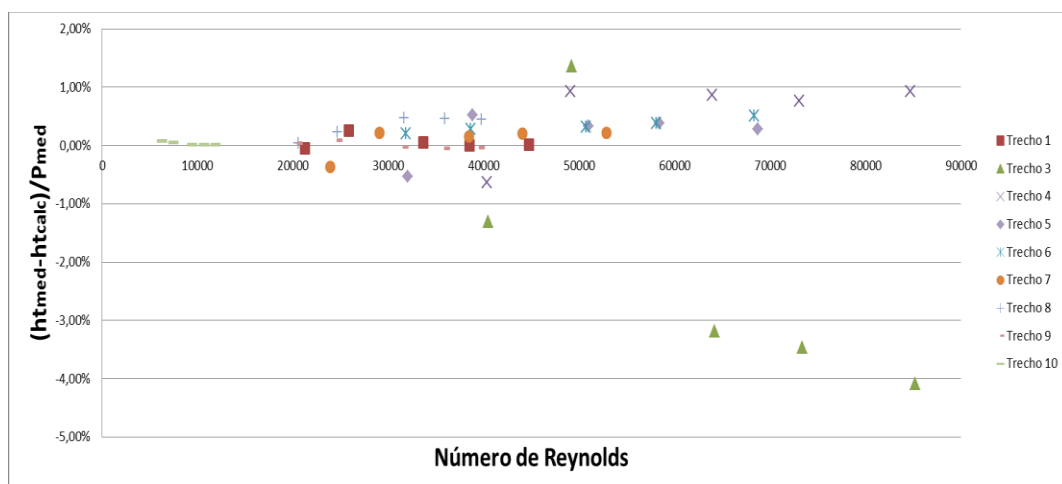
Os trechos 2 e 11 foram excluídos da análise, pois o primeiro apresenta uma divergência muito grande que pode ter sido causada pelo fato dos valores medidos estarem muito próximos da faixa de precisão do instrumento, o que gerou um elevado erro percentual, já o trecho 11 foi eliminado devido ao problema anteriormente citado. Analisando o gráfico percebe-se uma discrepância bastante alta entre os valores medidos e calculados, principalmente no trecho 10, onde ocorreram as maiores diferenças percentuais o que pode ter sido ocasionado pelo escoamento estar em uma fase de transição entre o regime laminar e turbulento o que acarreta maiores incertezas na determinação da perda de carga. A instalação dos transdutores diretamente sobre cruzetas e tês e próximo aos pontos de consumo, locais de

potencial elevada agitação e recirculação no escoamento, pode também prejudicar a medição além do fato do escoamento encontrar-se em uma zona de transição quanto ao desenvolvimento de perfil de velocidades. Segundo Maestri et al. (2008, p. 2.18) somente a partir de 40 diâmetros, que no caso da rede do Lenhs equivaleria a 1,6 metro, aproximadamente o tamanho dos trechos, de uma variação na geometria da tubulação o escoamento é considerado plenamente desenvolvido. Maestri et al (2008, p. 4.2) também cita fatores que podem acarretar erros ao considerar-se os valores de K encontrados na bibliografia:

Os coeficientes experimentais de perda de carga são obtidos entre pontos em que o regime está perfeitamente estabelecido, logo, no momento em que se tiver duas ou mais singularidades em série, próximas uma da outra, de tal forma que o regime não se tenha homogeneizado, elas deverão ser tratadas como um novo tipo de singularidade, pois se deve levar em conta a não linearidade na superposição dos efeitos.

Porém ao comparar-se a diferença nas perdas de carga e a pressão em cada nó torna-se muito reduzida a diferença, para a maior parte dos trechos menor do que 1%, excetuando-se o trecho 3, onde há instalada uma válvula solenoide Jefferson causadora de grande perda de carga localizada. A figura 18 demonstra esse comportamento.

Figura 18 –Relação entre a diferença da perda de carga medida e calculada e a pressão medida

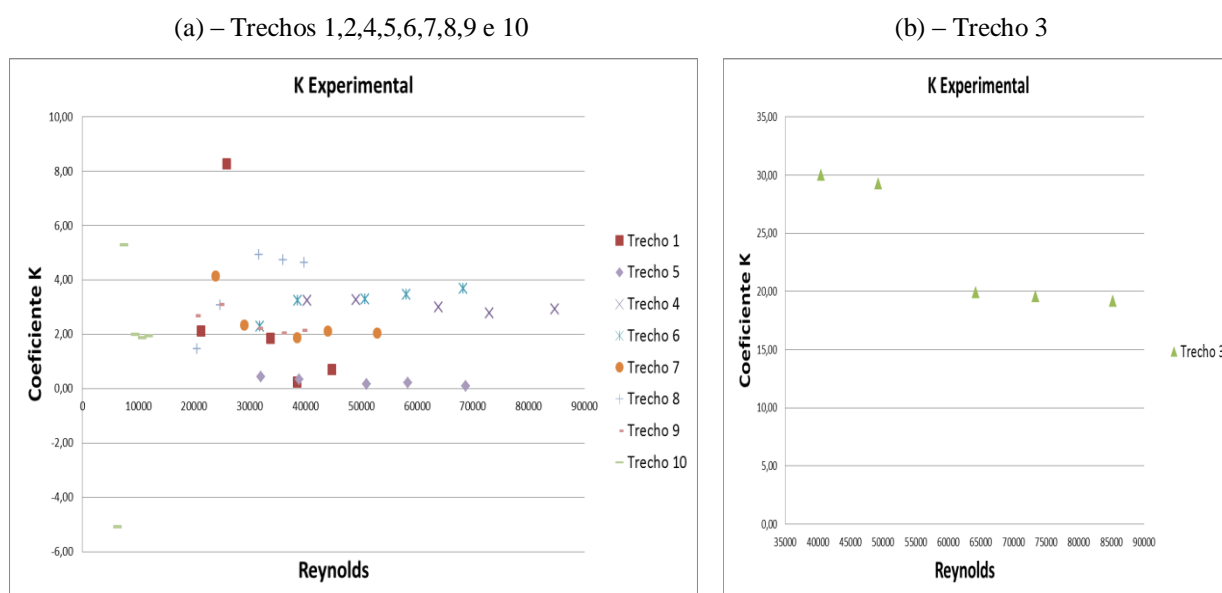


(fonte: elaborada pelo autor)

Com os resultados anteriores em mãos, foi empregada uma metodologia alternativa para cálculo do coeficiente K experimental, visando verificar a possibilidade de uma maior aproximação entre valores calculados e medidos. O valor do K experimental foi calculado

subtraindo da perda de carga medida na rede do Lenhs o valor da perda de carga linear calculada através do método de Darcy-Weisbach, resultando na perda de carga singular. Sabendo a perda de carga singular, através de simples operações algébricas foi determinado o valor de K em cada trecho. O coeficiente encontrado teve um comportamento variável função da velocidade do escoamento como visto na figura 19, entretanto o programa EPANET só permite a adoção de valores de K fixos, por isso foi utilizada a média dos valores obtidos para cada vazão, o que gerou, para cada trecho, os valores apresentados na tabela 12.

Figura 19 – Variação do Coeficiente K experimental em relação ao número de Reynolds



(fonte: elaborada pelo autor)

(fonte: elaborada pelo autor)

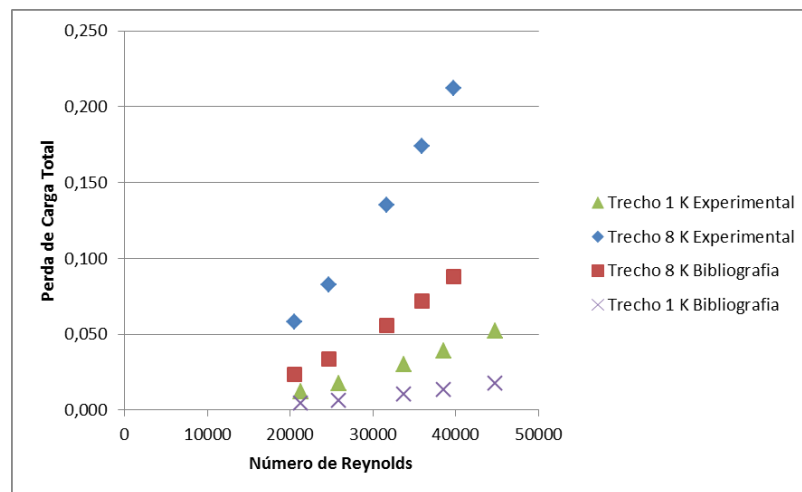
Tabela 12 – Coeficientes de perda de carga singular calculados a partir do modelo experimental

Trecho	K Bibliografia	K Experimental
1	0,6	2,64
3	26,95	23,57
4	1,8	3,04
5	1,8	2,71
6	3	3,19
7	1,8	2,50
8	1,8	3,77
9	3	2,44
10	1,8	1,20

(fonte: elaborada pelo autor)

A tabela 12 demonstra uma considerável diferença, em alguns trechos, entre o K sugerido na bibliografia e o valor observado na instalação do Lenhs. Diferenças dessa ordem ocasionam uma grande influência no resultado final da perda de carga na rede de distribuição analisada, principalmente para altos números de Reynolds. A figura 20 mostra resultados obtidos para perda de carga total calculados para o trechos 1 e 8, onde ocorreram as maiores diferenças, entre os K sugeridos pela bibliografia e obtidos no Lenhs.

Figura 20 – Comparação entre valores de perda de carga total calculada através de coeficientes K sugeridos pela bibliografia e observados no Lenhs

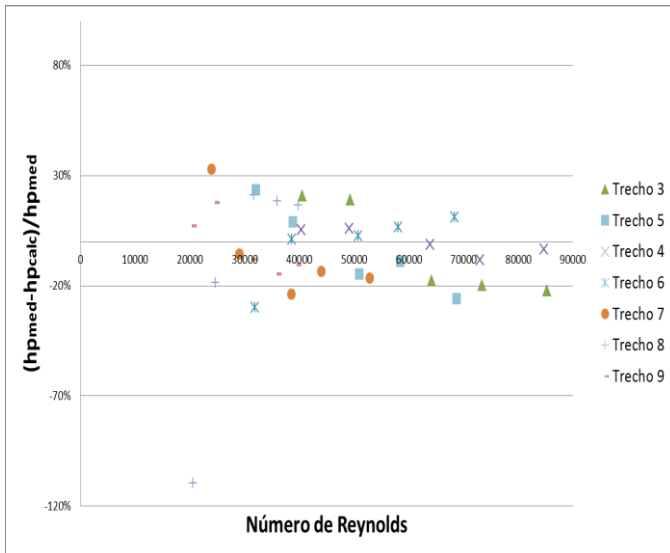


(fonte: elaborada pelo autor)

Com os novos coeficientes foram executados os cálculos de maneira análoga resultando em uma sensível diminuição nas divergências entre as grandezas medidas e calculadas e percebe-se o quão importante é a correta determinação dos parâmetros para cada estrutura analisada como pode ser visto nas figuras 21 e 22.

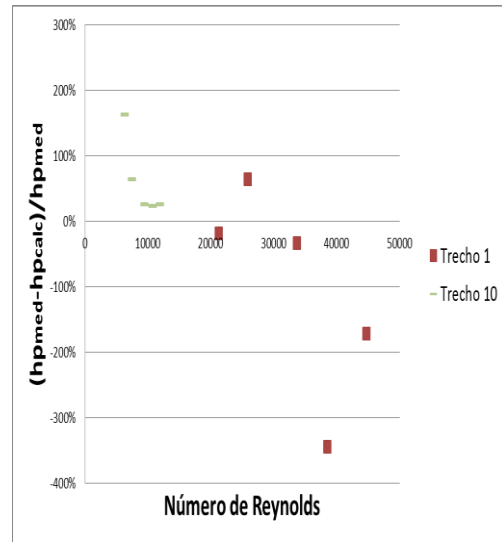
Figura 21(a) –Relação entre a diferença da perda de carga medida e calculada com o coeficiente K obtido experimentalmente

(a) – Trechos 3, 4, 5, 6, 7,8 e 9



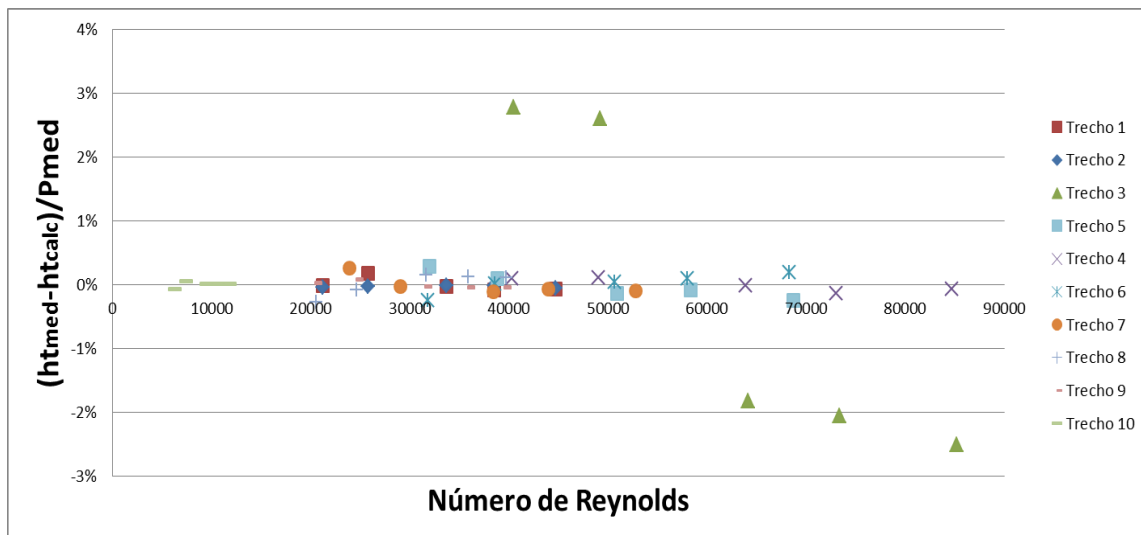
(fonte: elaborada pelo autor)

(b) – Trechos 1 e 10



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 22 – Relação entre a diferença da perda de carga medida e calculada com o coeficiente K obtido experimentalmente e a pressão medida



(fonte: elaborada pelo autor)

5.5.2 Análise dos Resultados Obtidos na Rede em Malha

A análise dos resultados na rede em malha foi feita levando em consideração a divergência na vazão passante em cada trecho nos dois modelos (numérico e experimental), já que, diferente da rede ramificada onde as vazões são idênticas, no caso da distribuição em malhas, como são introduzidas as demandas nos nós, cabe ao programa EPANET definir, de maneira que haja equilíbrio energético e volumétrico, a quantidade de fluxo em cada tubulação. É possível fazer uma relação entre os resultados obtidos para vazão e perda de carga já que a partilha das vazões é dependente da perda imposta por cada trecho, e não há sentido em serem comparadas as perdas de carga para tubulações onde não passam as mesmas vazões. As simulações foram realizadas tomando como coeficientes de perda singular os valores encontrados na literatura e valores calculados de maneira semelhante ao feito para a rede ramificada, como visto anteriormente, para rede malhada também houve variações dos coeficientes de perda de carga singular com o número de Reynolds e, portanto, foram adotados valores médios. A tabela 13 apresenta os coeficientes K atribuídos para os diferentes trechos.

Tabela 13 – Coeficientes de perda de carga singular calculados a partir do modelo experimental

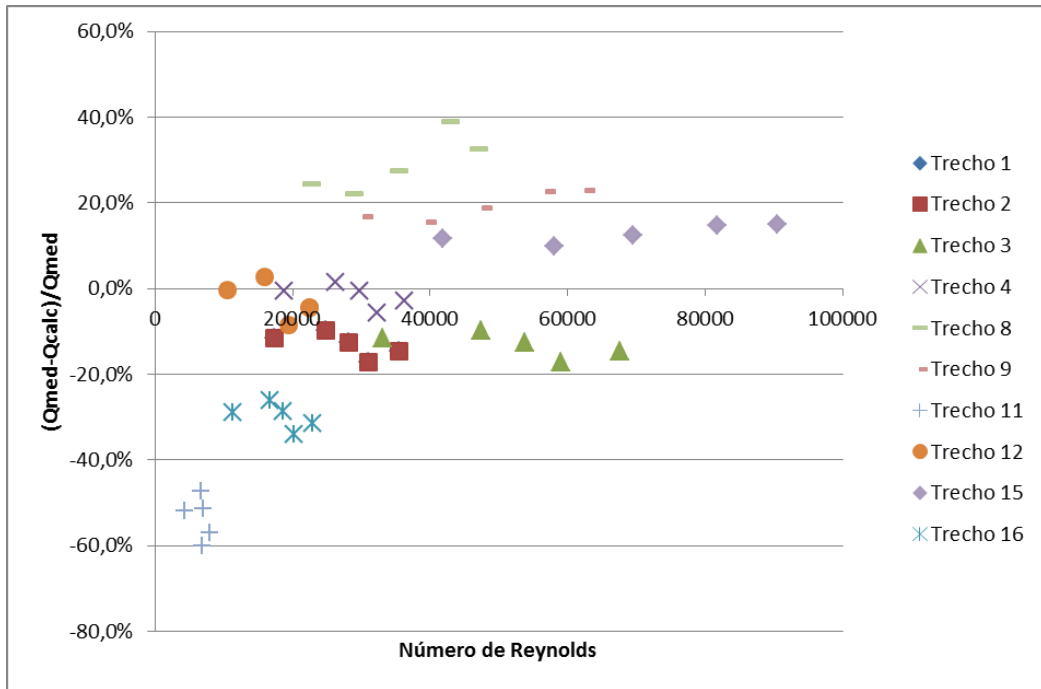
Trecho	Coeficiente K Bibliografia [-]	Coeficiente K Experimental [-]
1	0,6	0,60
2	0,6	9,10
3	26,95	42,41
4	1,8	4,25
16	3	11,89
12	3	3,00
11	3	3,00
14	1,8	24,07
15	26,95	24,77
9	1,8	3,38
8	1,8	1,79
7	3	3,00

(fonte: elaborada pelo autor)

Para os trechos em que os coeficientes calculados foram negativos, trechos 1, 11 e 12, foi escolhido o valor citado na bibliografia. As figuras 23 e 24 apresentam respectivamente as

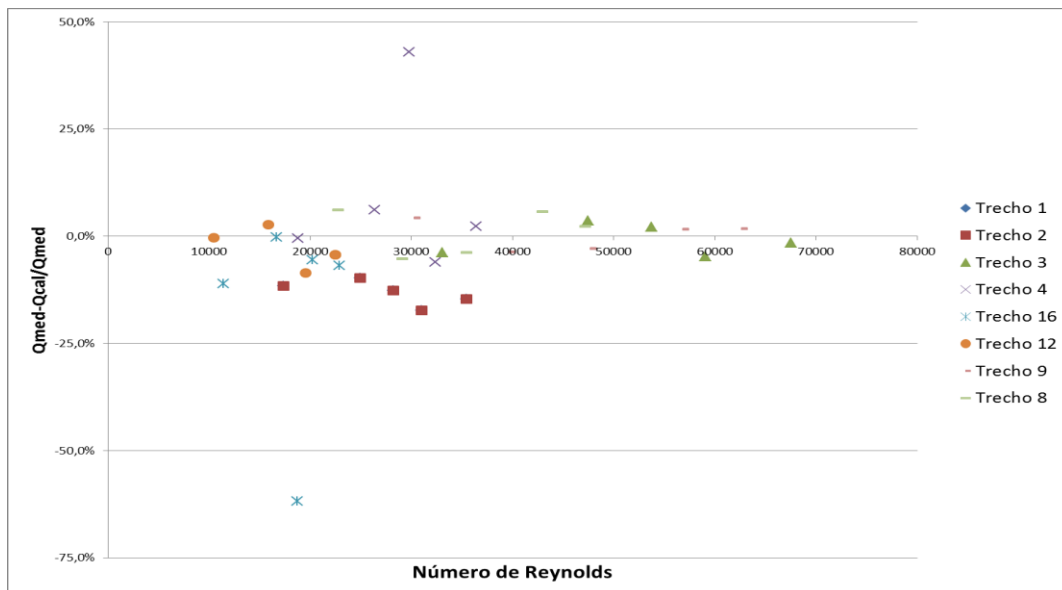
divergências nas vazões calculadas com o valor de K sugerido pela bibliografia e o K calculado.

Figura 23 – Divergência na vazão calculada com os coeficientes sugeridos pela bibliografia



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 24 – Diferença percentual na vazão calculada com os coeficientes medidos na instalação



(fonte: elaborada pelo autor)

É notável a queda das divergências no cálculo com os coeficientes provindos do experimento, e, ao contrário da simulação com os valores da bibliografia na qual não houve inversão do fluxo no trecho 7 para as maiores vazões, com os parâmetros obtidos experimentalmente o sentido do fluxo foi o mesmo do observado na rede de distribuição do Lenhs para todas as vazões. A tabela 14 apresenta como os resultados melhoraram frente a mudança de coeficiente e demonstra o quão importante é o seu conhecimento para a análise, tanto das perdas de carga quanto para a distribuição da vazão.

Tabela 14 – Diferenças na vazão calculada através dos coeficientes sugeridos pela bibliografia e calculados no modelo

	Trecho 1			Trecho 2		
	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais
Ensaio 1	1,07	-11,7%	-3,8%	1,07	-11,7%	-3,8%
Ensaio 2	1,53	-9,7%	3,6%	1,53	-9,7%	3,6%
Ensaio 3	1,74	-12,7%	2,2%	1,74	-12,7%	2,2%
Ensaio 4	1,91	-17,3%	-4,7%	1,91	-17,3%	-4,7%
Ensaio 5	2,19	-14,6%	-1,6%	2,19	-14,6%	-1,6%
	Trecho 3			Trecho 4		
	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais
Ensaio 1	1,07	-11,7%	-3,8%	0,61	-1%	-1%
Ensaio 2	1,53	-9,7%	3,6%	0,85	1%	6%
Ensaio 3	1,74	-12,7%	2,2%	0,96	-1%	43%
Ensaio 4	1,91	-17,3%	-4,7%	1,05	-6%	-6%
Ensaio 5	2,19	-14,6%	-1,6%	1,18	-3%	2%
	Trecho 7			Trecho 8		
	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais
Ensaio 1	0,13	-53%	-37%	0,73	24,5%	6,1%
Ensaio 2	0,11	-61%	45%	0,94	22,1%	-5,3%
Ensaio 3	0,17	-59%	25%	1,15	27,4%	-3,8%
Ensaio 4	0,27	SENTIDO ERRADO	30%	1,39	39,0%	5,7%
Ensaio 5	0,28		13%	1,53	32,6%	2,3%
	Trecho 9			Trecho 11		
	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais
Ensaio 1	0,98	17%	4%	0,14	-51,9%	-29,1%
Ensaio 2	1,28	16%	-4%	0,22	-47,2%	-1,6%
Ensaio 3	1,54	19%	-3%	0,23	-51,5%	-163,1%
Ensaio 4	1,84	23%	2%	0,22	-60,1%	-16,5%
Ensaio 5	2,03	23%	2%	0,26	-57,0%	-20,2%
	Trecho 12			Trecho 15		
	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais
Ensaio 1	0,34	0%	0%	1,35	11,7%	3,1%
Ensaio 2	0,51	3%	10%	1,88	9,9%	-2,7%
Ensaio 3	0,63	-9%	-9%	2,25	12,5%	-1,8%
Ensaio 4	0,73	-4%	4%	2,65	14,6%	1,0%
Ensaio 5	0,73	-4%	4%	2,93	14,9%	1,3%
	Trecho 16					
	Vazão Medida	Qmed-Qcalc/Qmed com valores da bibliografia	Qmed-Qcalc/Qmed com valores experimentais			
Ensaio 1	0,37	-29,1%	-11,1%			
Ensaio 2	0,54	-26,2%	-0,2%			
Ensaio 3	0,61	-28,7%	-61,8%			
Ensaio 4	0,65	-33,9%	-5,5%			
Ensaio 5	0,74	-31,5%	-6,8%			

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme visto ao longo do trabalho percebe-se que, com os ensaios realizados, não é possível fazer uma generalização das diferenças entre a perda de carga medida e calculada, pois elas variam tanto em função do trecho avaliado quanto do número de Reynolds. Além de, para o mesmo trecho, o valor do coeficiente de perda de carga singular medido foi bastante diferente ao comparar-se o ensaio em rede ramificada e em malha, mesmo com valores de número de Reynolds semelhantes, o que gera maior dificuldade na validação do modelo numérico para a rede de distribuição de água do Lenhs da UFRGS.

A presença de resultados abaixo do esperado quando considerando a relação percentual entre as perdas de carga medidas e calculadas pode ser decorrente de simplificações adotadas pelo modelo, que talvez em redes de distribuição convencionais não causem grande efeito, mas que na rede do Lenhs, devido ao grande número de acessórios, são mais significativas, tais como, a sobreposição de efeitos das singularidades e a variação do comportamento dos coeficientes de perda de carga singular frente a essas interações. O fato de o modelo numérico permitir somente a adoção de coeficientes K fixos, quando o comportamento visto na prática apresenta valores variáveis em função do número de Reynolds, ocasiona um aumento na divergência dos resultados. O local da instalação dos transdutores, em zonas de elevada agitação, onde o comportamento do escoamento é de alta complexidade, pode também ser prejudicial para as medições e, por conseguinte, gerar uma maior dificuldade na avaliação da perda de carga experimental.

Quando levado em conta as diferenças entre a perda de carga medida em relação à pressão observada no Lenhs, os valores obtidos são bastante satisfatórios. A consideração da pressão é recomendada devido ao método de avaliação da perda de carga experimental, no qual são consideradas as diferenças entre as medidas observadas entre dois **medidores de pressão** consecutivos e as respectivas cargas cinéticas.

Por fim, após a análise dos dados fica clara a melhora dos resultados obtidos com os valores de coeficientes de perda de carga singular medidos, pois além de levar em consideração as diferenças geométricas e hidráulicas entre os acessórios instalados e os utilizados pela bibliografia, permite o conhecimento do efeito causado por peças adjacentes. Em casos onde

não é possível ser feita medição dos valores *in loco*, tais como redes de distribuição urbanas ou em projetos de novas redes, é recomendável a procura de coeficientes medidos para cada peça junto ao fabricante. Em casos de redes operando em malha a busca por parâmetros corretos para cálculo de perda de carga é ainda mais importante, tendo em vista que esses também atuam na distribuição de vazões.

Para a continuidade do estudo, sugere-se:

- a) calibração dos instrumentos de medida;
- b) ampliação das faixas de vazão utilizadas;
- c) variação entre as distâncias das singularidades afim de que sejam melhor compreendidas as interações entre as perdas de carga.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M. B.; COELHO M. M. L. P.; CIRILO, J. A. (Org). **Hidráulica Aplicada**. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: ABRH, 2001.
- CRANE CO. **Flow of Fluids**: through valves, fittings, and pipe. New York: 1982. Technical Paper n. 410.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água**: dimensionamento econômico e operação de redes elevatórias. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2004.
- _____. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento**: análise econômica de projetos. Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- JEFFERSON SOLENOIDBRAS LTDA. **Solenoid Valves Magnetic Level Switches**: general catalog product data and specifications. São Bernardo do Campo: [201-]. Disponível em:<<http://jeffersonvalves.com/repositorio/pdfs-ingles/general-catalog.pdf>> Acesso em: 12 abr 2013.
- LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1972.
- MAESTRI, R. D.; UNGARETTI, R. L.; BORGES, A. L. O. **Hidráulica**. Porto Alegre, 2008. Disponível em:<<http://chasqueweb.ufrgs.br/~anaborges/textos%20%C3%A1rea%201.zip>>. Acesso em: 16 abr. 2013.
- NETTO, J. M. A.; ARAUJO, R.; FERNANDEZ, M. F.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. atual. (3. reimpr) São Paulo: Edgard Blücher, 1998 (reimpr. 2003).
- STREETER, V. L.; WYLIE, E.B. **Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica de São Paulo, 2006.
- WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A. **Water Distribution Modeling**, 1. ed. reimpr. Waterbury: Haestad Press, 2001.
- WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

APENDICE A – Planilhas de Cálculo da Rede Ramificada

Tabela A1 – Ensaio com bomba única operando a 80% da rotação nominal

Trecho	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento	Diâmetro	Vazão	Velocidade	REYNOLDS	K Bibliografia	Pressão Medidor de Montante	Pressão Medidor de Jusante	Perda de Carga Medida	Fator Perda de Carga Colebrook-White	Perda de Carga Linear Calculada	Perda de Carga Singular Calculada com Valores de K da Bibliografia	Perda de Carga Total com Valores de K da Bibliografia	K Experimental	Perda de Carga Calculada K experimental
			(m)	(mm)	(l/s)	(m/s)	[-]	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)
1	TPM 20	TPM24	1.58	77.9	1.31	0.27	21250.34	0.6	13.28	13.27	0.01	0.026	0.002007	0.00	0.00	2.13	0.01
2	TPM24	TPM28	1.58	77.9	1.31	0.27	21250.34	0.6	13.27	13.27	0.00	0.026	0.002007	0.00	0.00	-0.82	0.00
3	TPM28	TPM 27	1.33	40.9	1.31	1.00	40474.37	26.95	13.27	11.71	1.56	0.022	0.036655	1.37	1.40	29.97	1.23
4	TPM 27	TPM26	1.03	40.9	1.30	0.99	40337.81	1.8	11.71	11.52	0.19	0.022	0.028397	0.09	0.12	3.24	0.18
5	TPM26	TPM25	1.03	40.9	1.04	0.79	32042.88	1.8	11.52	11.38	0.14	0.023	0.018828	0.06	0.08	3.72	0.10
6	TPM25	TPM21	1.33	40.9	1.03	0.78	31863.90	3	11.38	11.28	0.10	0.023	0.024312	0.09	0.12	2.28	0.12
7	TPM21	TPM17	1.33	40.9	0.77	0.59	23924.72	1.8	11.28	11.20	0.09	0.025	0.014617	0.03	0.05	4.14	0.06
8	TPM17	TPM18	1.03	40.9	0.67	0.51	20559.91	1.8	11.20	11.17	0.03	0.026	0.008662	0.02	0.03	1.45	0.06
9	TPM18	TPM19	1.03	40.9	0.66	0.50	20488.45	3	11.17	11.13	0.04	0.026	0.008662	0.04	0.05	2.68	0.04
10	TPM19	TPM23	1.33	40.9	0.20	0.15	6275.49	1.8	11.13	11.13	0.00	0.035	0.00149	0.00	0.00	-5.09	0.00
11	TPM23	TPM22	1.03	40.9	0.21	0.16	6369.79	3	11.13	11.24	-0.11	0.035	0.001154	0.00	0.00	-90.28	0.00

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A2 – Ensaio com duas bombas em série operando com 70% da rotação nominal

Trecho	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento	Diâmetro	Vazão	Velocidade	REYNOLDS	K Bibliografia	Pressão Medidor de Montante	Pressão Medidor de Jusante	Perda de Carga Medida	Fator Perda de Carga Colebrook-White	Perda de Carga Linear Calculada	Perda de Carga Singular Calculada com Valores de K da Bibliografia	Perda de Carga Total com Valores de K da Bibliografia	K Experimental	Perda de Carga Calculada K experimental
			(m)	(mm)	(l/s)	(m/s)	[-]	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)
1	TPM 20	TPM24	1.58	77.9	1.59	0.33	25847.50	0.6	18.61	18.56	0.05	0.025	0.002781	0.00	0.01	8.27	0.02
2	TPM24	TPM28	1.58	77.9	1.59	0.33	25847.50	0.6	18.56	18.56	0.00	0.025	0.002781	0.00	0.01	-0.39	0.01
3	TPM28	TPM 27	1.33	40.9	1.59	1.21	49230.32	26.95	18.56	16.31	2.24	0.021	0.051232	2.02	2.07	29.23	1.82
4	TPM 27	TPM26	1.03	40.9	1.59	1.21	49051.83	1.8	16.31	16.03	0.28	0.021	0.039676	0.13	0.17	3.27	0.27
5	TPM26	TPM25	1.03	40.9	1.26	0.96	38826.61	1.8	16.03	15.86	0.17	0.022	0.026121	0.08	0.11	3.03	0.15
6	TPM25	TPM21	1.33	40.9	1.25	0.95	38636.29	3	15.86	15.68	0.18	0.022	0.033729	0.14	0.17	3.24	0.18
7	TPM21	TPM17	1.33	40.9	0.94	0.72	29053.14	1.8	15.68	15.60	0.08	0.024	0.020322	0.05	0.07	2.33	0.09
8	TPM17	TPM18	1.03	40.9	0.80	0.61	24675.01	1.8	15.60	15.53	0.07	0.025	0.011845	0.03	0.05	3.07	0.08
9	TPM18	TPM19	1.03	40.9	0.80	0.61	24653.90	3	15.53	15.46	0.07	0.025	0.011835	0.06	0.07	3.09	0.06
10	TPM19	TPM23	1.33	40.9	0.24	0.18	7468.71	1.8	15.46	15.45	0.01	0.034	0.001875	0.00	0.00	5.30	0.00
11	TPM23	TPM22	1.03	40.9	0.24	0.19	7570.65	3	15.45	15.58	-0.14	0.034	0.001452	0.01	0.01	-78.97	0.01

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A3 – Ensaio com duas bombas em série operando com 80% da rotação nominal

Trecho	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento	Diâmetro	Vazão	Velocidade	REYNOLDS	K Bibliografia	Pressão Medidor de Montante	Pressão Medidor de Jusante	Perda de Carga Medida	Fator Perda de Carga Colebrook-White	Perda de Carga Linear Calculada	Perda de Carga Singular Calculada com Valores de K da Bibliografia	Perda de Carga Total com Valores de K da Bibliografia	K Experimental	Perda de Carga Calculada K experimental
			(m)	(mm)	(l/s)	(m/s)	[-]	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)
1	TPM 20	TPM24	1.58	77.9	2.08	0.44	33689.73	0.6	28.20	28.18	0.02	0.023	0.004487	0.01	0.01	1.84	0.03
2	TPM24	TPM28	1.58	77.9	2.08	0.44	33689.73	0.6	28.18	28.18	0.01	0.023	0.004487	0.01	0.01	0.07	0.01
3	TPM28	TPM 27	1.33	40.9	2.08	1.58	64166.99	26.95	28.18	25.56	2.62	0.02	0.083192	3.44	3.52	19.90	3.09
4	TPM 27	TPM26	1.03	40.9	2.07	1.57	63907.96	1.8	25.56	25.11	0.44	0.02	0.064427	0.23	0.29	3.00	0.45
5	TPM26	TPM25	1.03	40.9	1.65	1.25	50957.46	1.8	25.11	24.88	0.23	0.021	0.042879	0.14	0.19	2.30	0.26
6	TPM25	TPM21	1.33	40.9	1.64	1.25	50696.14	3	24.88	24.57	0.32	0.021	0.055368	0.24	0.29	3.30	0.31
7	TPM21	TPM17	1.33	40.9	1.24	0.95	38466.29	1.8	24.57	24.45	0.12	0.022	0.033729	0.08	0.12	1.88	0.15
8	TPM17	TPM18	1.03	40.9	1.02	0.78	31663.82	1.8	24.45	24.28	0.17	0.023	0.018509	0.06	0.07	4.94	0.14
9	TPM18	TPM19	1.03	40.9	1.02	0.78	31609.33	3	24.28	24.19	0.09	0.023	0.018509	0.09	0.11	2.21	0.09
10	TPM19	TPM23	1.33	40.9	0.31	0.23	9460.56	1.8	24.19	24.18	0.01	0.032	0.002926	0.00	0.01	1.99	0.01
11	TPM23	TPM22	1.03	40.9	0.31	0.24	9559.28	3	24.18	24.33	-0.15	0.032	0.002256	0.01	0.01	-52.12	0.01

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A4 – Ensaio com duas bombas em série operando com 90% da rotação nominal

Trecho	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento	Diâmetro	Vazão	Velocidade	REYNOLDS	K Bibliografia	Pressão Medidor de Montante	Pressão Medidor de Jusante	Perda de Carga Medida	Fator Perda de Carga Colebrook-White	Perda de Carga Linear Calculada	Perda de Carga Singular Calculada com Valores de K da Bibliografia	Perda de Carga Total com Valores de K da Bibliografia	K Experimental	Perda de Carga Calculada K experimental
			(m)	(mm)	(l/s)	m/s	[-]	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)
1	TPM20	TPM24	1.58	77.9	2.37	0.50	38528.04	0.6	35.78	35.78	0.01	0.022	0.005688	0.01	0.01	0.24	0.04
2	TPM24	TPM28	1.58	77.9	2.37	0.50	38528.04	0.6	35.78	35.77	0.01	0.022	0.005688	0.01	0.01	0.05	0.01
3	TPM28	TPM27	1.33	40.9	2.37	1.81	73382.26	26.95	35.77	32.40	3.37	0.02	0.105775	4.49	4.60	19.58	4.03
4	TPM27	TPM26	1.03	40.9	2.36	1.80	73025.14	1.8	32.40	31.86	0.54	0.02	0.081916	0.30	0.38	2.77	0.58
5	TPM26	TPM25	1.03	40.9	1.89	1.44	58403.27	1.8	31.86	31.55	0.31	0.021	0.054703	0.19	0.24	2.44	0.34
6	TPM25	TPM21	1.33	40.9	1.88	1.43	58056.53	3	31.55	31.11	0.43	0.021	0.070636	0.31	0.38	3.46	0.40
7	TPM21	TPM17	1.33	40.9	1.42	1.08	44016.48	1.8	31.11	30.94	0.17	0.022	0.043132	0.11	0.15	2.12	0.19
8	TPM17	TPM18	1.03	40.9	1.16	0.88	35935.40	1.8	30.94	30.73	0.21	0.023	0.023216	0.07	0.10	4.74	0.17
9	TPM18	TPM19	1.03	40.9	1.16	0.88	35916.24	3	30.73	30.63	0.11	0.023	0.023216	0.12	0.14	2.05	0.12
10	TPM19	TPM23	1.33	40.9	0.35	0.26	10721.33	1.8	30.63	30.62	0.01	0.031	0.003697	0.01	0.01	1.87	0.01
11	TPM23	TPM22	1.03	40.9	0.35	0.27	10901.02	3	30.62	30.75	-0.13	0.031	0.002853	0.01	0.01	-36.16	0.01

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela A4 – Ensaio com duas bombas em série operando com 100% da rotação nominal

Trecho	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento	Diâmetro	Vazão	Velocidade	REYNOLDS	K Bibliografia	Pressão Medidor de Montante	Pressão Medidor de Jusante	Perda de Carga Medida	Fator Perda de Carga Colebrook-White	Perda de Carga Linear Calculada	Perda de Carga Singular Calculada com Valores de K da Bibliografia	Perda de Carga Total com Valores de K da Bibliografia	K Experimental	Perda de Carga Calculada K experimental
			(m)	(mm)	(l/s)	m/s	[-]	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)	(mca)	(mca)	[-]	(mca)
1	TPM20	TPM24	1.58	77.9	2.76	0.58	44730.36	0.6	43.98	43.96	0.02	0.022	0.007426	0.01	0.02	0.70	0.05
2	TPM24	TPM28	1.58	77.9	2.76	0.58	44730.36	0.6	43.96	43.97	0.00	0.022	0.007426	0.01	0.02	-0.71	0.02
3	TPM28	TPM27	1.33	40.9	2.76	2.10	85195.48	26.95	43.97	39.52	4.44	0.019	0.138932	6.06	6.20	19.15	5.43
4	TPM27	TPM26	1.03	40.9	2.74	2.09	84685.19	1.8	39.52	38.77	0.76	0.019	0.107594	0.40	0.51	2.93	0.78
5	TPM26	TPM25	1.03	40.9	2.22	1.69	68711.52	1.8	38.77	38.39	0.37	0.02	0.073377	0.26	0.34	2.05	0.47
6	TPM25	TPM21	1.33	40.9	2.21	1.68	68301.76	3	38.39	37.77	0.63	0.02	0.094749	0.43	0.53	3.67	0.56
7	TPM21	TPM17	1.33	40.9	1.71	1.30	52842.71	1.8	37.77	37.53	0.24	0.021	0.059651	0.16	0.22	2.05	0.28
8	TPM17	TPM18	1.03	40.9	1.29	0.98	39742.70	1.8	37.53	37.28	0.25	0.022	0.02782	0.09	0.12	4.63	0.21
9	TPM18	TPM19	1.03	40.9	1.28	0.98	39601.64	3	37.28	37.14	0.13	0.022	0.02781	0.15	0.17	2.15	0.15
10	TPM19	TPM23	1.33	40.9	0.38	0.29	11867.24	1.8	37.14	37.13	0.01	0.03	0.004349	0.01	0.01	1.95	0.01
11	TPM23	TPM22	1.03	40.9	0.39	0.30	12097.00	3	37.13	37.28	-0.14	0.03	0.003368	0.01	0.02	-32.50	0.02

(fonte: elaborada pelo autor)

APENDICE B – Planilhas de Cálculo da Rede em Malha

Tabela B1 – Ensaio com bomba única operando a 80% da rotação nominal

Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/min)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	K Bibliográfica [-]	Pressão Medidor de Montante (mca)	Pressão Medidor de Jusante (mca)	Perda de Carga Medida (mca)	Vazão Calculada com K da Bibliografia (l/s)	K Calculado	Vazão Calculada com K Experimental	
1	TPM20	TPM24	1.58	77.90	64.14	1.07	0.22	0.60	12.24	12.25	-0.01	1.21	-2.94	1.11
2	TPM24	TPM28	1.58	77.90	64.14	1.07	0.22	0.60	12.25	12.21	0.04	1.21	14.09	1.11
3	TPM28	TPM27	1.33	40.90	64.14	1.07	0.81	26.95	12.21	9.62	2.60	1.21	76.78	1.11
4	TPM27	TPM26	1.03	40.90	36.41	0.61	0.46	1.80	9.62	9.53	0.09	0.61	7.91	0.61
16	TPM27	TPM23	1.33	40.90	22.14	0.37	0.28	3.00	9.62	9.54	0.08	0.52	19.32	0.41
12	TPM26	TPM22	1.33	40.90	20.32	0.34	0.26	3.00	9.53	9.67	-0.14	0.34	-40.56	0.34
11	TPM23	TPM22	1.03	40.90	8.37	0.14	0.11	3.00	9.54	9.67	-0.13	0.29	-224.67	0.18
14	TPM22	TPM21	1.03	40.90	17.76	0.30	0.23	1.80	9.67	9.55	0.12	0.44	45.60	0.34
15	TPM20	TPM19	1.33	40.90	81.12	1.35	1.03	26.95	12.24	9.67	2.58	1.21	47.63	1.31
9	TPM19	TPM18	1.03	40.90	58.91	0.98	0.75	1.80	9.67	9.55	0.11	0.84	3.97	0.94
8	TPM18	TPM17	1.03	40.90	44.08	0.73	0.56	1.80	9.55	9.53	0.02	0.59	1.19	0.69
7	TPM17	TPM21	1.33	40.90	7.87	0.13	0.10	3.00	9.53	9.55	-0.02	0.28	-32.43	0.18

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B2 – Ensaio com duas bombas em série operando com 70% da rotação nominal

Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/min)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	K Bibliográfica [-]	Pressão Medidor de Montante (mca)	Pressão Medidor de Jusante (mca)	Perda de Carga Medida (mca)	Vazão Calculada com K da Bibliografia (l/s)	K Calculado	Vazão Calculada com K Experimental	
1	TPM20	TPM24	1.58	77.90	92.08	1.53	0.32	0.00	20.04	20.06	-0.02	1.70	-2.99	1.48
2	TPM24	TPM28	1.58	77.90	92.08	1.53	0.32	0.60	20.06	19.99	0.07	1.70	13.30	1.48
3	TPM28	TPM27	1.33	40.90	92.08	1.53	1.17	26.95	19.99	17.15	2.84	1.70	40.76	1.48
4	TPM27	TPM26	1.03	40.90	51.14	0.85	0.65	1.80	17.15	17.06	0.09	0.84	4.32	0.8
16	TPM27	TPM23	1.33	40.90	32.34	0.54	0.41	3.00	17.15	17.05	0.10	0.73	11.67	0.54
12	TPM26	TPM22	1.33	40.90	30.80	0.51	0.39	3.00	17.06	17.17	-0.12	0.50	-14.78	0.46
11	TPM23	TPM22	1.03	40.90	12.99	0.22	0.16	3.00	17.05	17.17	-0.12	0.41	-88.43	0.22
14	TPM22	TPM21	1.03	40.90	28.68	0.48	0.36	1.80	17.17	17.03	0.14	0.65	21.04	0.43
15	TPM20	TPM19	1.33	40.90	112.71	1.88	1.43	26.95	20.04	17.24	2.81	1.71	26.87	1.93
9	TPM19	TPM18	1.03	40.90	76.98	1.28	0.98	1.80	17.24	17.07	0.17	1.11	3.53	1.33
8	TPM18	TPM17	1.03	40.90	56.40	0.94	0.72	1.80	17.07	17.02	0.05	0.77	1.75	0.99
7	TPM21	TPM17	1.33	40.90	6.59	0.11	0.08	3.00	17.02	17.03	-0.01	0.28	-24.43	0.06

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B3 – Ensaio com duas bombas em série operando com 80% da rotação nominal

Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/min)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	K Bibliográfica [-]	Pressão Medidor de Montante (mca)	Pressão Medidor de Jusante (mca)	Perda de Carga Medida (mca)	Vazão Calculada com K da Bibliografia (l/s)	K Calculado	Vazão Calculada com K Experimental	
1	TPM20	TPM24	1.58	77.90	104.24	1.74	0.36	0.60	26.16	26.18	-0.02	1.99	-2.90	1.7
2	TPM24	TPM28	1.58	77.90	104.24	1.74	0.36	0.60	26.18	26.13	0.06	1.99	8.60	1.7
3	TPM28	TPM27	1.33	40.90	104.24	1.74	1.32	26.95	26.13	22.96	3.16	1.99	35.41	1.7
4	TPM27	TPM26	1.03	40.90	57.80	0.96	0.73	1.80	22.96	22.86	0.10	0.97	3.69	0.55
16	TPM27	TPM23	1.33	40.90	36.34	0.61	0.46	3.00	22.96	22.85	0.11	0.85	10.13	0.98
12	TPM26	TPM22	1.33	40.90	34.96	0.58	0.44	3.00	22.86	22.97	-0.10	0.59	-10.24	0.17
11	TPM23	TPM22	1.03	40.90	13.68	0.23	0.17	3.00	22.85	22.97	-0.11	0.47	-72.54	0.6
14	TPM22	TPM21	1.03	40.90	30.93	0.52	0.39	1.80	22.97	22.81	0.16	0.76	20.13	0.47
15	TPM20	TPM19	1.33	40.90	134.96	2.25	1.71	26.95	26.16	23.13	3.03	2.00	20.27	2.29
9	TPM19	TPM18	1.03	40.90	92.68	1.54	1.18	1.80	23.13	22.90	0.23	1.30	3.28	1.59
8	TPM18	TPM17	1.03	40.90	68.81	1.15	0.87	1.80	22.90	22.83	0.07	0.90	1.68	1.19
7	TPM17	TPM21	1.33	40.90	10.42	0.17	0.13	3.00	22.83	22.81	0.03	0.42	29.89	0.13

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B4 – Ensaio com duas bombas em série operando com 90% da rotação nominal

Arco	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/min)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	K Bibliográfica [-]	Pressão Medidor de Montante (mca)	Pressão Medidor de Jusante (mca)	Perda de Carga Medida (mca)	Vazão Calculada com K da Bibliografia (l/s)	K Calculado	Vazão Calculada com K Experimental
1	TPM 20	TPM24	1.58	77.90	114.61	1.91	0.40	0.60	33.06	33.07	-0.01	2.31	-1.48	2
2	TPM24	TPM28	1.58	77.90	114.61	1.91	0.40	0.60	33.07	33.03	0.04	2.31	5.41	2
3	TPM28	TPM 27	1.33	40.90	114.61	1.91	1.45	26.95	33.03	29.57	3.45	2.31	32.00	2
4	TPM 27	TPM26	1.03	40.90	62.81	1.05	0.80	1.80	29.57	29.48	0.10	1.11	2.96	1.11
16	TPM 27	TPM 23	1.33	40.90	39.24	0.65	0.50	3.00	29.57	29.45	0.12	0.99	9.56	0.69
12	TPM 26	TPM 22	1.33	40.90	37.86	0.63	0.48	3.00	29.48	29.57	-0.09	0.69	-7.86	0.69
11	TPM 23	TPM 22	1.03	40.90	13.39	0.22	0.17	3.00	29.45	29.57	-0.12	0.56	-79.88	0.26
14	TPM 22	TPM 21	1.03	40.90	31.02	0.52	0.39	1.80	29.57	29.41	0.16	0.91	19.78	0.6
15	TPM 20	TPM19	1.33	40.90	158.83	2.65	2.01	26.95	33.06	29.89	3.17	2.31	15.28	2.62
9	TPM 19	TPM 18	1.03	40.90	110.43	1.84	1.40	1.80	29.89	29.58	0.31	1.50	3.13	1.81
8	TPM18	TPM17	1.03	40.90	83.38	1.39	1.06	1.80	29.58	29.45	0.13	1.00	2.27	1.31
7	TPM 17	TPM 21	1.33	40.90	16.21	0.27	0.21	3.00	29.45	29.41	0.04	0.12	16.53	0.19

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela B4 – Ensaio com duas bombas em série operando com 100% da rotação nominal

Arco	Medidor de Pressão de Montante	Medidor de Pressão de Jusante	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/min)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)	K Bibliográfica [-]	Pressão Medidor de Montante (mca)	Pressão Medidor de Jusante (mca)	Perda de Carga Medida (mca)	Vazão Calculada com K da Bibliografia (l/s)	K Calculado	Vazão Calculada com K Experimental
1	TPM 20	TPM24	1.58	77.90	131.10	2.19	0.46	0.60	40.49	40.50	-0.01	2.56	-0.91	2.22
2	TPM24	TPM28	1.58	77.90	131.10	2.19	0.46	0.60	40.50	40.45	0.04	2.56	4.09	2.22
3	TPM28	TPM 27	1.33	40.90	131.10	2.19	1.66	26.95	40.45	36.63	3.83	2.56	27.09	2.22
4	TPM 27	TPM26	1.03	40.90	70.57	1.18	0.90	1.80	36.63	36.53	0.10	1.21	2.38	1.15
16	TPM 27	TPM 23	1.33	40.90	44.38	0.74	0.56	3.00	36.63	36.48	0.14	1.08	8.81	0.79
12	TPM 26	TPM 22	1.33	40.90	43.62	0.73	0.55	3.00	36.53	36.60	-0.08	0.76	-4.80	0.7
11	TPM 23	TPM 22	1.03	40.90	15.48	0.26	0.20	3.00	36.48	36.60	-0.12	0.60	-61.13	0.31
14	TPM 22	TPM 21	1.03	40.90	36.44	0.61	0.46	1.80	36.60	36.41	0.19	0.98	17.71	0.64
15	TPM 20	TPM19	1.33	40.90	175.76	2.93	2.23	26.95	40.49	36.99	3.50	2.55	13.78	2.89
9	TPM 19	TPM 18	1.03	40.90	121.59	2.03	1.54	1.80	36.99	36.63	0.36	1.65	2.99	1.99
8	TPM18	TPM17	1.03	40.90	91.52	1.53	1.16	1.80	36.63	36.48	0.14	1.15	2.09	1.49
7	TPM 17	TPM 21	1.33	40.90	16.53	0.28	0.21	3.00	36.48	36.41	0.07	0.10	31.26	0.24

(fonte: elaborada pelo autor)