

## **AVALIAÇÃO DE TRAÇADOS DE REDE DE ABASTECIMENTO COM AUXÍLIO DE PLANILHA ELETRÔNICA E EPANET**

Vinicius de Oliveira Ribeiro (UEMS) E-mail: [viniciusoribeiro@yahoo.com.br](mailto:viniciusoribeiro@yahoo.com.br)  
Flávia Maria Fogaça (UEMS) E-mail: [flaviamariafogaca@gmail.com](mailto:flaviamariafogaca@gmail.com)

**Resumo:** Este trabalho teve por objetivo avaliar quali-quantitativamente o projeto de uma rede malhada fictícia de água, elaborado por acadêmicos, através do método de Hardy-Cross, com auxílio de planilha eletrônica, bem como dimensionamento auxiliado pelo software de simulação hidráulica, EPANET Brasil, e seu módulo de dimensionamento otimizado (Lenhsnet), defrontando-os com o projeto concebido por projetista com larga experiência na área de saneamento. Como resultados, os traçados dos acadêmicos em planilha eletrônica se mostraram, em média, com valores de instalação superiores ao proposto por Tsutiya (2006). O dimensionamento com auxílio do software, adequadamente utilizado por projetista com pouca experiência, atingiu as soluções mais econômicas sob os itens avaliados, tanto tendo como os parâmetros de projeto os dados propostos por Tsutiya (2006), quanto com os preconizados pela ABNT/NBR 12218/1994.

**Palavras-chave:** Abastecimento de Água; EPANET; Hardy-Cross.

## **EVALUATION OF SUPPLY NETWORK LAYOUTS WITH THE AID OF ELECTRONIC SPREADSHEET AND EPANET**

**Abstract:** The aim of this work was to qualitatively and quantitatively evaluate the design of a fictitious water mesh network, developed by students using the Hardy-Cross method. It was done with the aid of a spreadsheet, as well as design aided by the hydraulic simulation software EPANET Brasil and its optimized sizing module (Lenhsnet). Furthermore, they were confronted with the project conceived by a designer with extensive experience in sanitation. As a result, the students' layouts in electronic spreadsheets demonstrated, on average, higher installation costs than those proposed by Tsutiya (2006). The software-aided design, suitably used by a designer with little experience, reached the most economical solutions under the evaluated items, both having the data proposed by Tsutiya (2006) as the design parameters and those recommended by ABNT / NBR 12218 / 1994.

**Keywords:** Water Supply; EPANET; Hardy-Cross.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas de abastecimento de água são definidos como o conjunto de obras, equipamentos e serviços, que tem por finalidade fornecer água em qualidade e quantidade suficientes para as populações, garantindo a saúde humana, desenvolvimento industrial, entre outros (AZEVEDO NETTO et al., 1998; PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006).

A rede de distribuição de abastecimento de água é parte constituinte do sistema de abastecimento de água, sendo composta por tubulações e órgãos acessórios, com a finalidade de conduzir a água potável até a população continuamente, sob quantidade e pressão recomendadas, conforme a norma NBR 12218/1994 (ABNT, 1994).

A norma supracitada define ainda que a constituição do traçado da rede de abastecimento de água é basicamente por condutos primários e secundários (ABNT, 1994). Segundo Tsutiya (2006), a canalização primária (ou principal) é o conjunto de tubulações com diâmetros maiores e que abastecem as canalizações secundárias, que são tubulações que possuem diâmetros menores e têm por função abastecer os pontos consumidores de água, como por exemplo, as indústrias e residências.

Através da disposição dos condutos principais e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias, é possível definir uma rede como ramificada ou como malhada. A escolha do tipo de rede a ser empregada deve levar em consideração as características viárias e topográficas da região, assim como o porte da cidade a ser abastecida (PORTO, 2006).

Pode-se ainda ter a rede mista, que é aquela em que, numa mesma rede de distribuição de água, existem configurações de rede tanto malhada como ramificada (TSUTIYA, 2006; JUSTINO; NOQUEIRA, 2013).

Na rede ramificada, a distribuição de água é feita por um conduto principal, que é abastecido por um reservatório ou por uma estação elevatória, e que abastece diretamente os condutos secundários, tendo o sentido de escoamento conhecido em qualquer trecho da rede. A rede malhada, por outro lado, possui várias tubulações tronco que formam anéis ou malhas, o que possibilita a flexibilidade do fluxo de escoamento, de acordo com demanda e manutenção da rede, proporcionando o mínimo possível de interrupção no abastecimento de água (PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006).

A possibilidade de reversão no sentido do fluxo nas tubulações da rede malhada, facilitando a manutenção da rede e o contínuo abastecimento perante imprevistos, faz com que ela seja a mais utilizada na maioria das cidades (PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006).

O dimensionamento das redes malhadas é comumente realizado por soluções aproximadas, ou seja, baseiam-se em tentativas e erros, até que se obtenha uma precisão desejada, sendo que os métodos mais conhecidos para tal são o método do seccionamento e o método de cálculos iterativos (TSUTIYA, 2006). A norma NBR 12218/94, que dispõe das diretrizes para projetos de rede de distribuição de água para abastecimento público, recomenda que em casos de circuitos fechados, como os anéis ou malhas das redes malhadas, o dimensionamento deve ser realizado por métodos de cálculos iterativos (ABNT, 1994).

O custo das obras é um fator extremamente relevante na concepção de sistemas de abastecimento de água. Deste modo, o dimensionamento ótimo de uma rede é aquele em que se têm o menor custo de implantação e operação das tubulações da rede e de estações elevatórias, desde que o dimensionamento atenda aos parâmetros recomendados necessários para o bom funcionamento do sistema (TSUTIYA, 2006). A experiência do projetista tem grande influência na busca pela melhor solução.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo comparar quali-quantitativamente o dimensionamento de uma rede malhada fictícia de abastecimento de água proposta por Tsutiya (2006), com projetos dimensionados pelo método de Hardy-Cross, em planilha eletrônica, por acadêmicos da disciplina de Hidráulica do curso de Engenharia Ambiental da UEMS, dos anos letivos de 2015 a 2016, e com dimensionamento realizado no módulo Lenhsnet do software EPANET 2.0 Brasil (LENHS, 2017).

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

A linha de raciocínio metodológico deste trabalho consistiu na orçamentação do dimensionamento da rede fictícia dimensionada por Tsutiya (2006), Engenheiro projetista com larga experiência em projetos de saneamento básico.

Complementarmente, efetuou-se orçamentação dos traçados efetuados pelos acadêmicos do curso de engenharia ambiental da UEMS, na disciplina de Hidráulica, da mesma área fictícia de projeto proposta por Tsutiya. Os acadêmicos não dispunham do projeto traçado pelo autor para elaboração de seus projetos.

Na sequência, utilizando o LENHSNET (módulo de dimensionamento otimizado de redes do EPANET 2.0 Brasil) e realizando simulações no software EPANET 2.0 Brasil, versão 2.00.12 (LENHS, 2017), efetuou-se o traçado da rede de abastecimento da rede fictícia, primeiramente com os parâmetros de projeto propostos pelo projetista experiente, e posteriormente, com os parâmetros recomendados pela norma NBR 12218/1994 (ABNT, 1994).

Por fim foram analisados os traçados quali-quantitativamente, a fim de se verificar a influência da experiência do projetista nos custos previstos à implantação de projetos de redes de abastecimento de água e atendimento aos parâmetros que garantem o bom funcionamento dos traçados dimensionados.

Para o orçamento, elaborou-se a composição de custos de execução de redes de abastecimento considerando preços de tubulação e serviços de assentamento. Essa composição de preços foi elaborada com base no boletim de preços da Empresa de Saneamento Básico de Mato Grosso do Sul – SANESUL (SANESUL, 2017), referente a Janeiro de 2017, e composição de custos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI (SINAPI, 2017), para o Mato Grosso do Sul, referente a março de 2017, que resultam de trabalhos técnicos da Caixa Econômica Federal e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, que realiza pesquisas mensais de preços de materiais, salários e equipamentos utilizados na construção civil, nas capitais brasileiras (CAIXA, 2017), elencados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição de preços do assentamento e tubulação de PVC e Ferro Fundido.

Diâmetro (mm)	Tubulação (R\$/m)		Assentamento (R\$/m)	
	PVC	Ferro Fundido	PVC	Ferro Fundido
100	35,68	-	2,87	-
150	71,30	-	3,45	-
200	126,93	-	4,02	-
250	188,30	-	4,60	-
300	273,68	-	5,75	-
350	-	1.004,92	-	14,93
400	-	1.100,82	-	16,46
450	-	1.344,23	-	19,23
500	-	1.444,24	-	21,34
600	-	1.562,29	-	25,79
700	-	1.646,64	-	32,47
800	-	2.945,71	-	37,44
1000	-	4.371,84	-	43,77

Fonte: Adaptado de SANESUL (2017) e SINAPI (2017).

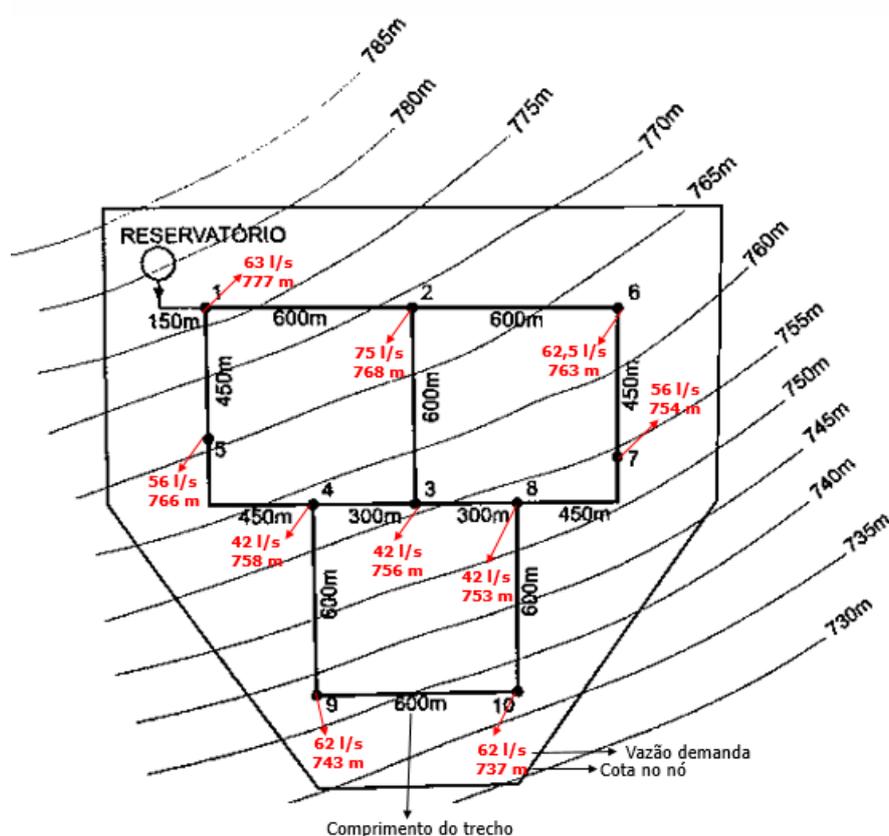
No boletim de preços da SANESUL (2017), os preços têm o incremento de Benefício e Despesas Indiretas - BDI de 26,4 % nos serviços e de 15,0 % nos materiais. Estes percentuais também foram aplicados nos valores retirados da composição SINAPI.

Os orçamentos de todos os traçados de rede dimensionados, tanto pelo método de *Hardy-Cross*, quando pelo Software EPANET, levaram em consideração os custos de material e assentamento das tubulações.

## 2.1 Traçado Modelo proposto por Tsutiya

A área de projeto utilizada remete-se a uma rede de distribuição fictícia, proposta por Tsutiya (2006), para ilustração de dimensionamento de redes de distribuição através do método de *Hardy-Cross* (Figura 1).

Figura 1 – Planta utilizada na elaboração do dimensionamento da rede de abastecimento de água (Adaptado de TSUTIYA, 2006).



O projetista utilizou-se dos seguintes parâmetros: densidade demográfica de 500 hab/ha; consumo *per capita* de água de 200 L/hab.dia; coeficiente do dia de maior consumo ( $K_1$ ) de 1,20; coeficiente da hora de maior consumo ( $K_2$ ) de 1,50; Cota máxima do nível de água no reservatório de 800 m; e cota mínima do nível de água no reservatório de 796 m. Desta forma, infere-se que a cota mínima do reservatório foi de 16 mH<sub>2</sub>O, e a cota máxima, de 20 mH<sub>2</sub>O, considerando cota topográfica do terreno de 780 m.

Os comprimentos dos trechos e curvas de nível utilizados para o dimensionamento do traçado modelo estão apresentados na Figura 1. A cota dos nós foram adotadas por Tsutiya (2006) no dimensionamento conforme estimativas, e também estão demonstradas na Figura 1.

Cada nó de pressão do traçado fictício abastece uma população, que tem uma vazão demandada em função de sua área de influência. Com a densidade demográfica da área, o

autor calculou as vazões demandadas por nó por unidade de área, ou seja, a vazão específica de distribuição, através da Equação 1.

$$q_d = \frac{K_1 K_2 d q}{86400 A} \quad (1)$$

Onde:  $q_d$  = vazão específica de distribuição (L/s.ha); A = área a ser abastecida (ha);  $K_1$  = coeficiente do dia de maior consumo;  $K_2$  = coeficiente da hora de maior consumo; d = densidade demográfica (hab/ha); e q = consumo *per capita* de água (L/hab.dia).

Posteriormente, após calcular a vazão específica de cada nó, multiplicando-a pela área (em hectares) de influência do nó, o projetista obteve as vazões demandadas conforme Figura 1. Após, o autor atribuiu os diâmetros utilizando como referência a Tabela 2, que determina o diâmetro a ser utilizado em função da vazão máxima desejada no trecho, mostrando a velocidade máxima obtida a partir dela.

Tabela 2 – Velocidade máxima e vazão máxima em função do diâmetro da tubulação.

Diâmetro (mm)	Velocidade máxima (m/s)	Vazão máxima (L/s)
50	0,50	1,0
75	0,50	2,2
100	0,60	4,7
150	0,80	14,1
200	0,90	28,3
250	1,10	53,9
300	1,20	84,8
350	1,30	125,0
400	1,40	176,0
450	1,50	238,0
500	1,60	314,0
550	1,70	403,0
600	1,80	509,0

Fonte: Adaptado de Martins, 1976 apud Tsutiya, 2006.

Com os dados apresentados, o projetista executou o método de *Hardy-Cross*, através da modalidade de compensação de vazão. Esse método é aplicado apenas aos condutos principais da rede de distribuição de água de uma rede malhada. No método, a vazão de demanda concentrada em cada nó dos anéis (ou malhas) é conhecida, assim, fez-se uma distribuição inicial de vazões para cada trecho dos anéis, de modo a atender todos os nós. As condições que devem ser satisfeitas indicando que a distribuição de vazões admitidas está correta são (AZEVEDO NETTO et al., 1998; PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006):

- Em um nó qualquer da rede, a soma algébrica das vazões é igual a zero;
- Em um circuito fechado (anel ou malha) qualquer da rede de distribuição de água, a soma algébrica das perdas de carga (partindo e chegando ao mesmo nó) é igual a zero.

Se pelo menos um dos anéis obtiver a somatória das perdas de cargas diferente de zero, a rede não está equilibrada e, portanto a vazão admitida nos trechos deverá ser corrigida. Essa correção se dá pela soma algébrica de um valor de correção ( $\Delta Q$ ) na vazão de cada trecho, conforme Equação 2 (AZEVEDO NETTO, 1998; PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006):

$$\Delta Q = - \frac{\sum \Delta H}{n \sum \frac{\Delta H}{Q}} \quad (2)$$

Onde:  $\Delta Q$  = Valor de correção da vazão do trecho do anel (L/s);  $\Delta H$  = Perda de carga do trecho do anel (m);  $Q$  = Vazão do trecho do anel (L/s);  $n = 1,85$  (utilizando-se a fórmula de Hazen-Williams nos cálculos de perda de carga).

Obtidas as novas vazões em cada anel, deve-se recalculas as perdas de carga e prosseguir com o método até que se obtenha, em todos os anéis do sistema, valores de  $\Delta Q$  muito pequenos ou nulos. O número de iterações necessárias para obter-se tal resultado depende, em grande parte, da margem de erro das estimativas iniciais adotada para a vazão de cada trecho e do porte da rede (PORTO, 2006; TSUTIYA, 2006).

Para o cálculo da perda de carga o projetista utilizou a fórmula de Hazen-Williams (Equação 3), e o coeficiente de rugosidade do material da tubulação  $C = 120$ , conforme Tsutiya (2006).

$$J = 10,65 \frac{Q^{1.85}}{C^{1.85} D^{4.87}} \quad (3)$$

Onde:  $J$  = Perda de carga unitária (m/m);  $Q$  = Vazão no trecho ( $m^3/s$ );  $C$  = Coeficiente de rugosidade do material da tubulação ( $m^{0,367}/s$ );  $D$  = diâmetro da tubulação (m).

Ao obter o dimensionamento com  $\Delta Q$  nulo ou muito pequeno, o sistema está em equilíbrio, mas pode-se ainda obter valores inadequados de velocidade de escoamento nos trechos e/ou pressões nos nós dos anéis. Nesse caso, devem-se fazer as correções necessárias, como modificação criteriosa do diâmetro da rede no primeiro caso, e alteração na altura do reservatório ou recalcar a rede, para o segundo caso (PORTO, 2006).

Aplicando o método descrito anteriormente, Tsutiya (2006) realizou duas iterações para atender a condição de perda de carga, ou seja, realizou duas correções nas vazões que foram estimadas inicialmente por trecho.

Finalizado o dimensionamento, o projetista realizou a verificação de pressão dinâmica mínima na rede. Posteriormente, os autores deste trabalho realizaram as verificações de velocidades máximas e mínimas na rede do traçado modelo, pressão estática máxima nos nós da rede, e orçamentação do projeto.

## 2.2 Traçados dos Estudantes

Seguindo todos os parâmetros utilizados no dimensionamento do traçado modelo, o mesmo traçado foi dimensionado por acadêmicos da disciplina de Hidráulica do curso de Engenharia Ambiental da UEMS, no ano letivo de 2015, utilizando *Hardy-Cross*.

Importante frisar que os acadêmicos não tinham conhecimento da solução proposta por Tsutiya (2006). As vazões de demandas dos nós, fornecidas aos discentes, também foram as mesmas utilizadas pelo projetista em seu dimensionamento. As cotas foram estimas pelos estudantes conforme as curvas de nível utilizadas pelo projetista.

Os 10 (dez) estudantes da disciplina foram divididos em pares, totalizando 05 (cinco) grupos. O critério de parada foi o mesmo proposto no item anterior, ou seja, a somatória das perdas de carga nula ou próxima de zero, com limite de 03 (três) iterações para este atendimento.

Os dimensionamentos foram realizados com auxílio de planilha eletrônica. Finalizado o dimensionamento, os estudantes realizaram as verificações para pressão estática máxima, pressão dinâmica mínima e velocidades na rede. Por fim, realizou-se o orçamento dos traçados dimensionados.

### 2.3 Traçados por EPANET

Foram realizados 02 (dois) traçados em ambiente EPANET. O primeiro seguindo os mesmos parâmetros adotados por Tsutiya (2006), com os limites de velocidade da Tabela 2, denominado EPANET-Modelo, e o segundo utilizando o limite de velocidade máxima de 3,5 m/s, conforme recomendação da norma 12218/1994 da ABNT, denominado de EPANET-ABNT.

#### 2.3.1 EPANET-Modelo

Para tal, fez-se o traçado da rede fictícia no EPANET. Em seguida, adicionou-se as informações de demandas de vazão e cota dos nós; nível máximo e mínimo de água do reservatório de nível variável, bem como altura inicial de lâmina d'água no reservatório; e comprimentos dos trechos da rede.

Posteriormente, no módulo Lenhsnet, na opção “Dados dos tubos” inseriu-se os diâmetros e respectivos valores que foram apresentados na composição de preços da Tabela 1, bem como o material da tubulação (se de PVC ou de Ferro fundido) e o coeficiente de rugosidade da tubulação,  $C=120$ .

Em seguida, configurou-se a opção “Dados de Projeto” do módulo Lenhsnet de modo que o traçado respeitasse os limites de velocidades da Tabela 2 (Tabela utilizada nos dimensionamentos por *Hardy-Cross*), ou seja, no EPANET-Modelo, adotou-se velocidade mínima de 0,6 m/s (similar a Tabela 2, levando em consideração o menor diâmetro adotado neste trabalho, DN 100); pressão dinâmica mínima de 10 mH<sub>2</sub>O; e sem limitar a velocidade.

O traçado foi realizado com reservatório de nível variável, para manter o padrão utilizado no traçado modelo, entretanto, para facilitar a simulação, considerou-se no Lenhsnet, em “Dados do Projeto”, o reservatório como sendo de nível fixo. O último trecho não foi dividido para aproveitamento de pressão, de forma a seguir os padrões do traçado modelo.

Com isso, executou-se o dimensionamento no módulo Lenhsnet. Segundo Maia Júnior (2012), este módulo compreende um algoritmo que realiza um processo dinâmico e iterativo no dimensionamento, partindo de uma configuração inicial de rede de distribuição de água, e substituindo os diâmetros da rede pelos mínimos diâmetros fornecidos pelo projetista a tabela do módulo. Além de fornecer pressões máximas e mínimas e também velocidades máximas e mínimas na rede. Tendo esses dados inseridos em seu módulo, o dimensionamento é realizado com base no balanceamento hidráulico da rede através do simulador hidráulico, buscando

atender às condições impostas por equações de conservação de massa nos nós da rede e por conservação de energia nos anéis de pressão.

Assim, partindo-se da configuração de diâmetros iniciais mínimos (fornecidos na tabela), o algoritmo dinamicamente, substitui o diâmetro do trecho mais econômico pelo diâmetro imediatamente superior, verificando o atendimento as condicionantes estabelecidas. Esse processo é realizado em todos os diâmetros até que se tenha finalizado o dimensionamento otimizado (MAIA JÚNIOR, 2012).

O autor supracitado afirma que para que o trecho seja efetivamente substituído, o algoritmo verifica o ganho de pressão e o custo necessário para este ganho, com isso, compara os resultados e então escolhe o de menor custo para o maior ganho de pressão. O autor afirma ainda que a variação de pressão é calcula comparando os valores obtidos no nó mais desfavorável da rede, ou seja, com menor pressão de toda a rede. Essa diferença obtida na variação de pressão e o custo para implementação resulta em um gradiente de pressão ( $G_p$ ) (Equação 4). Após analisar a substituição de todos os trechos, o algoritmo escolherá o menor gradiente de pressão obtido, ou seja, o gradiente de pressão ótimo, e com isso o trecho desse gradiente ótimo será efetivamente substituído.

$$G_p = \frac{C_2 - C_1}{\Delta p} \quad (4)$$

Onde:  $C_1$  = Custo do trecho em seu diâmetro original;  $C_2$  = Custo do trecho no diâmetro superior ao original; e  $\Delta p$  = variação de pressão no nó mais desfavorável da rede.

No traçado, o dimensionamento atendeu a todas as restrições impostas simultaneamente e o traçado apresentou-se com pressões negativas, visto que o Lenhsnet atribuiu DN 100 para todos os trechos. Com isso, adicionou-se aos trechos valores de diâmetros similares aos do traçado modelo e executou-se o dimensionamento. O dimensionamento não atendeu a velocidade mínima atribuída ao projeto, mostrando mensagem de não atendimento aos limites estabelecidos, porém na sequência, apresentou mensagem de dimensionamento terminado e de simulação bem sucedida. Posteriormente, editaram-se manualmente os diâmetros dos trechos com velocidades superiores as da Tabela 2, de modo que o diâmetro adotado atendesse a velocidade máxima sugerida na tabela. Para verificar o atendimento, utilizou-se o simulador do EPANET.

Por fim, realizou-se o orçamento do traçado conforme composição de preços mencionada anteriormente e calculou-se a pressão estática máxima e pressão dinâmica mínima.

### 2.3.2 EPANET-ABNT

Para o dimensionamento do traçado EPANET - ABNT fez-se o mesmo procedimento adotado para o EPANET-Modelo, mas limitando-se a velocidade para 3,5 m/s. O mesmo não atendimento para a velocidade mínima foi obtido, e com o dimensionamento terminado, editou-se os diâmetros dos trechos da rede manualmente, de modo que o traçado melhor atendesse aos limites estabelecidos e levando em consideração o custo do traçado.

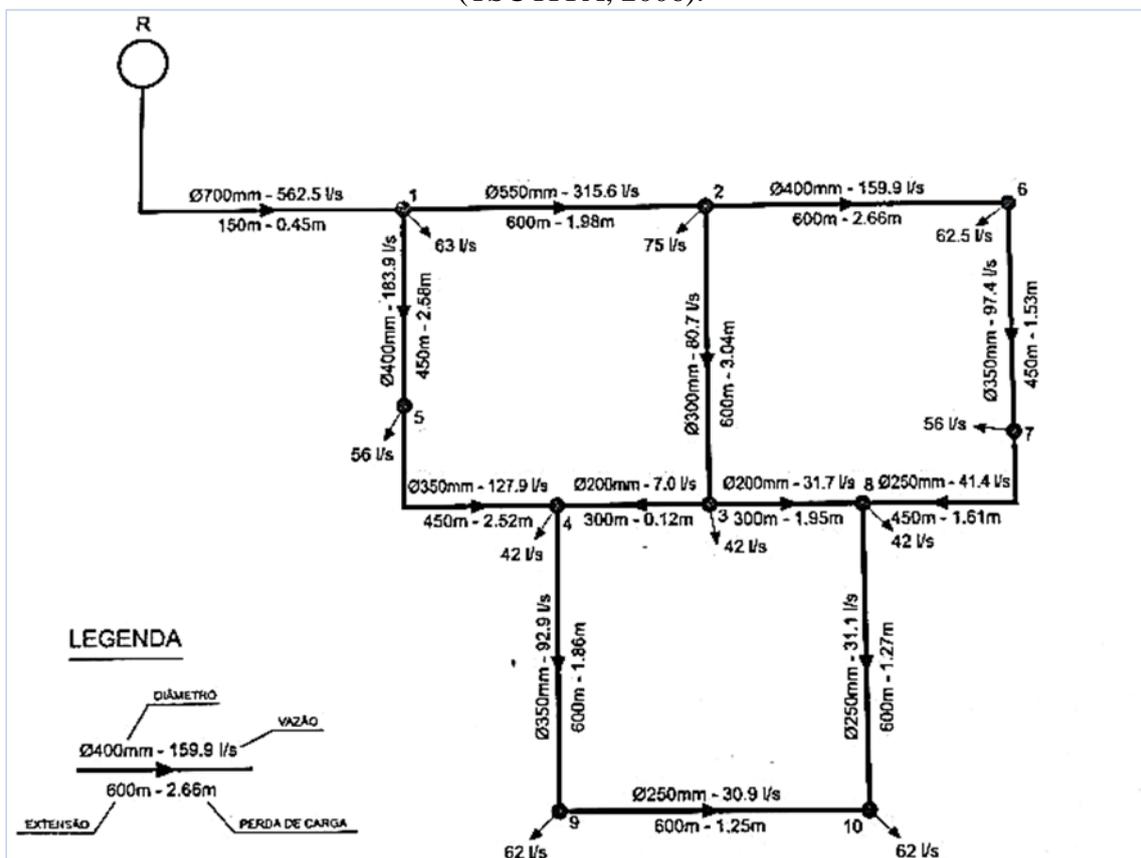
Ao término, de maneira análoga ao executado para o EPANET-Modelo, realizou-se o orçamento do traçado e cálculo da pressão estática máxima e pressão dinâmica mínima.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Traçado Modelo

Os valores finais de traçado obtidos por Tsutiya (2006) são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Resultado do dimensionamento do traçado modelo dimensionado por *Hardy-Cross* (TSUTIYA, 2006).



Como um dos diâmetros adotados por Tsutiya (2006) não foi levantado na composição de preços (550 mm) por não ser encontrado comercialmente, adotou-se para este diâmetro o mesmo preço da tubulação e assentamento do diâmetro de 600 mm. A adoção deu-se porque usualmente, na falta de algum diâmetro, na maioria dos casos ele é substituído pelo diâmetro comercial imediatamente superior.

Para diâmetros de 100-300 mm considerou-se como material das tubulações o policloreto de vinila - PVC 1 MPa (102 mH<sub>2</sub>O), pois o PVC é atualmente um dos materiais mais utilizados nas redes de abastecimento de água nesta faixa de diâmetro. Para diâmetros superiores a 300 mm, utilizou-se na orçamentação tubos de Ferro Fundido K7 que possuem pressão máxima de serviço variando de 2.6 MPa (265 mH<sub>2</sub>O) para diâmetro de 1000 mm até 4,1 MPa (418 mH<sub>2</sub>O) para diâmetro de 350 mm (SAINT-GOBAIN, 2006), pois também são bastante usuais em redes de distribuição de água para diâmetros superiores.

O coeficiente de rugosidade do material da tubulação de ambos foi considerado  $C = 120$  (Hazen-Willians), para manter o padrão de comparação com Tsutiya (2006).

A demonstração da orçamentação do traçado modelo está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Orçamento do traçado modelo.

Trecho	Comprimento (L) (m)	Diâmetro (mm)	Preço Tubulação + assentamento (P) (R\$/m)	Valor total (L x P) (R\$)
R-1	150	700	1682,12	252.318,00
1-2	600	550	1588,07	952.842,00
2-3	600	300	279,43	167.658,00
3-4	300	200	130,95	39.285,00
4-5	450	350	1019,84	458.928,00
5-1	450	400	1117,27	502.771,50
2-6	600	400	1117,27	670.362,00
6-7	450	350	1019,84	458.928,00
7-8	450	250	192,90	86.805,00
8-3	300	200	130,95	39.285,00
8-10	600	350	192,90	115.740,00
10-9	600	250	192,90	115.740,00
9-4	600	250	1019,84	611.904,00
<b>Total</b>	-	-	-	<b>4.472.566,50</b>

Os parâmetros observados para garantir o bom funcionamento da rede obtidos para o traçado modelo dimensionado (Figura 2), juntamente com o valor de orçamento total para implantação da tubulação da rede estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Orçamento total, pressões máximas e mínimas nos nós, e velocidades máximas e mínimas da rede, do traçado modelo.

	Orçamento Total (R\$)	Pressão Estática Máxima (mH <sub>2</sub> O)	Pressão Dinâmica Mínima (mH <sub>2</sub> O)	Velocidade Máxima (m/s)	Velocidade Mínima (m/s)
Traçado Modelo	4.472.566,50	63,00	18,55	1,89	0,22

De acordo com Maia Júnior (2012), o atendimento a pressão dinâmica mínima é necessário para garantir o abastecimento em todos os pontos da rede e o de pressão estática máxima está relacionada com a resistência da canalização e controle de perdas de cargas.

No traçado obtido, é possível observar que os valores obtidos para pressão estática máxima (63 mH<sub>2</sub>O) na rede não atendem às recomendações da norma NBR 12218/1994 da ABNT, que recomenda a pressão estática máxima de 50 mH<sub>2</sub>O na rede de distribuição de água.

Embora a pressão estática máxima não tenha atendido à recomendação da norma citada anteriormente, a tubulação de PVC utilizada no orçamento suporta pressões de até 102 mH<sub>2</sub>O, e a tubulação de ferro fundido suporta até 265 mH<sub>2</sub>O (diâmetro de 1000 mm), além

desse valor aumentar conforme o diâmetro da tubulação diminuí, tornando o valor de pressão estática máxima obtido suportável pela tubulação. Deve ser avaliada a necessidade de instalação de válvulas redutoras de pressão nos trechos críticos, que são os trechos de fim de rede, anteriores ao nó mais distante do reservatório, ou seja, trecho 8-10 e o trecho 9-10, visto que o nó 10 obteve valor de pressão estática máxima de 63 mH<sub>2</sub>O. O trecho 4-9 também deve ser observado, pois a pressão estática máxima do nó 9 foi de 57 mH<sub>2</sub>O.

A velocidade mínima obtida na rede (0,22 m/s) também não atende a recomendação da norma 12218/1994 da ABNT, que recomenda a velocidade mínima na rede de distribuição de água de 0,60 m/s.

O valor de velocidade mínima foi obtido no trecho 3-4. De acordo com Tisutiya (2006), velocidades mais baixas na rede promovem melhor durabilidade da tubulação e minimizam efeitos de transição no fluxo do escoamento decorrente das variações de pressão, entretanto, facilitam a ocorrência de depósito de materiais presentes na água.

A velocidade mínima na rede é necessária, principalmente, para garantir que não ocorra a sedimentação do cloro, e desta forma, garantir a qualidade da água que chega a população e demais consumidores. Por isso, a Portaria MS n° 2914/2011, em seu Art. 34 estabelece que “É obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre ou 2 mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2 mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede)”. Deve-se avaliar operacionalmente a necessidade de cloração adicional e pontos de monitoramento onde as velocidades estiverem abaixo do recomendado em norma.

Outra opção para os trechos com baixas velocidades é a instalação de *boosters*, que segundo Bezerra et al. (2006), são equipamentos colocados no trecho para aumentar a pressão na rede. Desta forma, a instalação de *boosters* irá causar turbulência e aumentar a velocidade do trecho.

### 3.2 Traçados dos Estudantes

Nos dimensionamentos realizados pelos estudantes, utilizando o método de *Hardy-Cross*, estipulou-se como 3 (três) o número máximo de iterações para o dimensionamento, e o critério de parada adotado foi que a somatória da perda de carga de cada um dos 3 anéis fosse igual ou inferior a 0,5 m. A Tabela 5 apresenta os resultados dos diâmetros dos dimensionamentos realizados.

Tabela 5 – Resultado dos balanceamentos dos diâmetros do traçado realizados através do método de Hardy-Cross pelos estudante.

Trecho	Comprimento do trecho (m)	Diâmetro (mm)				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra5
R-1	150	700	700	700	700	700
1-2	600	500	600	600	500	600
2-3	600	250	450	300	350	350
3-4	300	250	250	150	350	200
4-5	450	450	350	350	500	350
5-1	450	500	400	450	500	400
2-6	450	400	350	400	350	400
6-7	600	350	250	350	250	350
7-8	450	250	200	250	200	250

3-8	300	250	350	200	350	250
4-9	600	350	350	350	350	350
9-10	600	250	250	250	250	200
8-10	600	250	250	250	250	250

Como o método de *Hardy-Cross* consiste na distribuição de vazão de forma que todos os nós sejam atendidos adequadamente, e a escolha dos diâmetros foi feita através da vazão desejada no trecho (Tabela 2), após as iterações de correção da distribuição realizada, a vazão inicialmente distribuída é ajustada (Tabela 6).

Tabela 6 – Resultado dos balanceamentos da distribuição de vazão nos trechos do traçado realizados através do método de Hardy-Cross pelos estudantes.

Trecho	Comprimento do trecho (m)	Vazão (l/s)				
		1	2	3	4	5
R-1	150	562,51	562,51	562,70	562,50	562,51
1-2	600	258,54	340,39	307,75	242,57	325,20
2-3	600	42,74	162,97	73,99	70,45	104,37
3-4	300	46,09	24,71	7,12	66,82	8,06
4-5	450	185,21	103,37	136,45	257,53	118,56
5-1	450	241,46	159,62	192,75	201,28	174,81
2-6	450	140,80	102,42	158,46	97,12	145,83
6-7	600	78,3	39,92	95,96	34,62	83,33
7-8	450	22,05	16,33	39,66	21,62	27,08
3-8	300	47,15	96,59	39,41	95,57	54,64
4-9	600	27,53	38,59	37,37	32,24	40,05
9-10	600	34,96	23,91	25,13	30,26	22,45
8-10	600	97,46	86,41	87,63	92,76	84,95

As mesmas inconsistências de velocidade mínima e pressão estática máxima na rede no traçado dimensionado por Tsutiya (2006) foram observadas nos demais dimensionamentos realizados pelos estudantes (Tabela 7), isso porque ambos utilizam a mesma tabela para escolha do diâmetro em função da vazão desejada, obtendo uma velocidade máxima que pode ocorrer no trecho através dessa escolha (Tabela 2), e porque as cotas dos nós estimadas foram muitos similares por todos os projetistas, como esperado, já que todos realizam essa estimativa através dos valores da mesma planta (Figura 1), além de que todos os estudantes adotaram para os níveis de água do reservatório, os mesmo níveis propostos por Tsutiya (2006). Desta forma, sugere-se para essas inconsistências as mesmas recomendações atribuídas ao traçado modelo, em caso de execução de um dos projetos.

Tabela 7 – Orçamento total, pressões máximas e mínimas nos nós, e velocidades máximas e mínimas na rede, dos traçados dimensionados pelos estudantes de Engenharia Ambiental.

Amostra	Orçamento Total (R\$)	Pressão Estática Máxima (mH <sub>2</sub> O)	Pressão Dinâmica Mínima (mH <sub>2</sub> O)	Velocidade Máxima (m/s)	Velocidade Mínima (m/s)
1	4.695.682,50	63,00	18,55	1,46	0,45
2	4.949.778,00	62,50	19,30	1,76	0,40

3	4.529.322,00	63,00	18,55	1,76	0,39
4	5.275.501,50	62,50	19,05	1,89	0,34
5	4.898.227,50	63,00	18,55	1,46	0,26

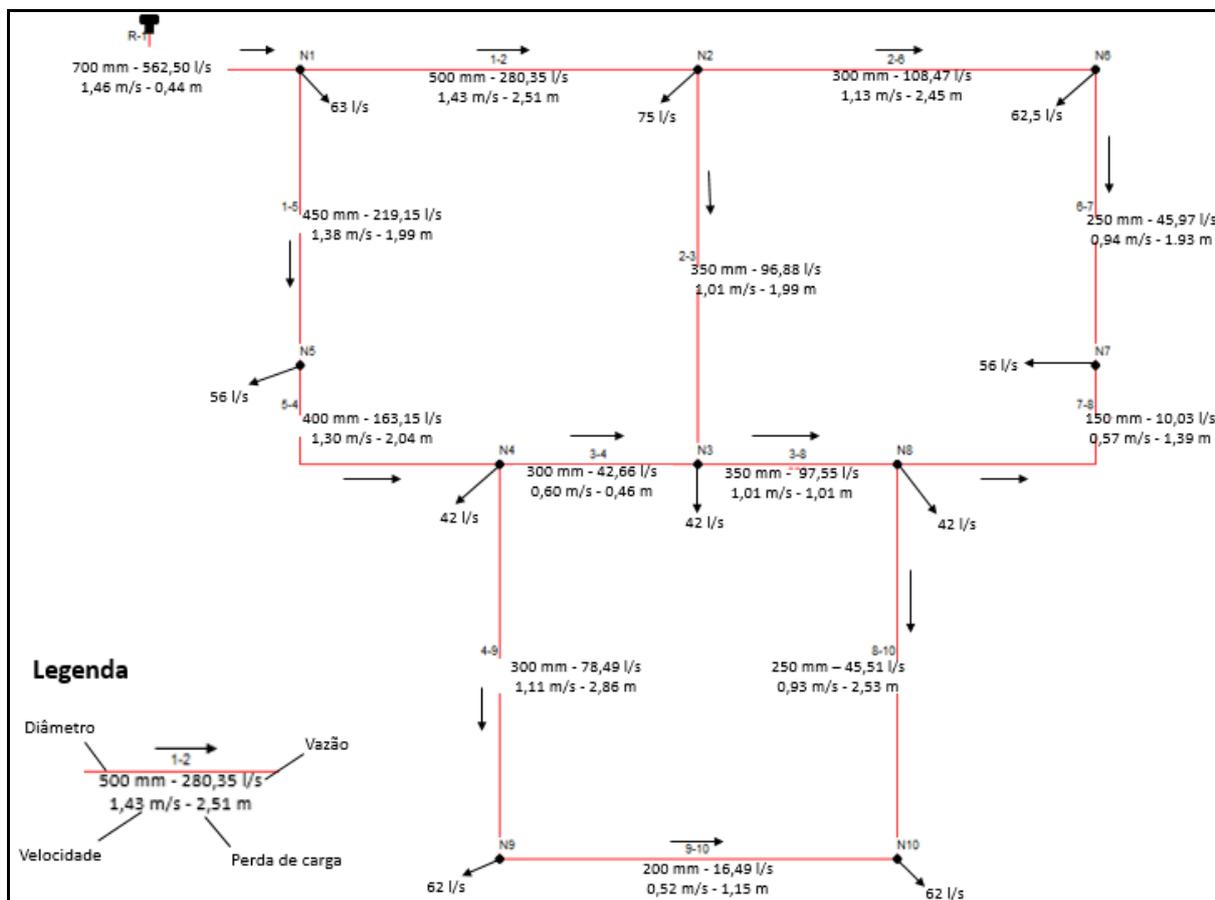
Obteve-se uma média de custos dos traçados discentes de R\$ 4.869.702,30 para a instalação da rede de abastecimento de água. Valor este cerca de 9 (nove) % superior ao obtido por Tsutiya (2006) (R\$ 4.472.566,50). Ao se comparar os valores individuais de orçamento das alternativas discentes, verifica-se que traçado mais oneroso chegou a ser cerca de 18 (dezoito) % superior que o traçado modelo. Observa-se complementarmente que nenhum projeto foi mais econômico que o traçado de Tsutiya, mostrando que a experiência do projetista influencia na obtenção de projetos mais econômicos.

### 3.3 Traçado em EPANET

#### 3.3.1 EPANET - Modelo

Utilizando no programa, inicialmente, os parâmetros do traçado modelo, que apresenta velocidades máximas inferiores aos recomendados pela norma NBR 12218 (ABNT, 1994), obteve-se o traçado observado na Figura 3. Como na Tabela 2 não consta o limite de velocidade para o diâmetro de 700 mm, adotou-se como limite o valor de 1,90 m/s.

Figura 3 – Traçado do dimensionamento realizado no Lenhsnet, denominado de EPANET – Modelo.



Por utilizar os mesmos parâmetros do traçado modelo, o traçado da Figura 3 obteve o mesmo valor para pressão estática máxima (63 mH<sub>2</sub>O). Isso deve-se à topografia da área em que a rede foi dimensionada.

Para a pressão dinâmica mínima na rede ocorreu praticamente a mesma similaridade (18,56 mH<sub>2</sub>O), que se deu no nó 1 da rede, ponto este em que até então o traçado se apresentou similar ao traçado modelo. Para as velocidades na rede, obteve-se velocidade máxima de 1,46 m/s e mínima de 0,52 m/s. Na tabela 8 visualiza-se comparativamente os traçados modelo e EPANET-Modelo.

Tabela 8 – Comparação entre o traçado modelo e o traçado dimensionado em EPANET - Modelo seguindo os padrões de velocidades adotados por Tsutiya (2006).

Trecho	Vazão (l/s)		Diâmetro (mm)		Velocidade (m/s)	
	Traçado Modelo	Traçado EPANET-Modelo	Traçado Modelo	Traçado EPANET-Modelo	Traçado Modelo	Traçado EPANET-Modelo
R-1	562,50	562,50	700	700	1,46	1,46
1-2	315,60	280,35	550	500	1,33	1,43
2-3	80,70	96,88	300	350	1,14	1,01
3-4	7,00	42,66	200	300	0,22	0,60
4-5	127,90	163,15	350	400	1,33	1,30
5-1	183,90	219,15	400	450	1,46	1,38
2-6	159,90	108,47	400	300	1,27	1,13
6-7	97,40	45,97	350	250	1,01	0,94
7-8	41,40	10,03	250	150	0,84	0,57
3-8	31,70	97,55	200	350	1,01	1,01
4-9	92,90	78,49	350	300	0,63	1,11
9-10	30,90	16,49	250	250	0,63	0,93
8-10	31,10	45,51	250	200	0,97	0,52

Na análise da velocidade mínima do traçado modelo, que foi de 0,22 m/s, com o valor do EPANET-Modelo de 0,52 m/s, observa-se um incremento devido à redução do diâmetro da tubulação. Ao observar tal modificação sob a luz da norma técnica vigente, torna-se um valor mais aceitável que o do traçado de Tsutiya. Outra diferença observada e que influencia na velocidade, é o fato do traçado modelo ter 200 mm como seu menor diâmetro, enquanto no traçado EPANET-Modelo, o menor diâmetro foi de 150 mm. Além disso, o traçado modelo teve em sua composição 07 (sete) trechos de tubulação de ferro fundido, enquanto que para o traçado EPANET-Modelo este número foi de 06 (seis).

Vale ressaltar que para todos os não atendimentos as normas técnicas, sugere-se as mesmas recomendações atribuídas ao traçado modelo.

Observando as velocidades nos trechos, verificou-se que o traçado modelo obteve velocidade máxima superior (1,99 m/s) à do traçado EPANET-Modelo (1,46 m/s). Mesmo assim, o orçamento total obtido através do dimensionamento do EPANET – Modelo foi de R\$ 4.343.988,00, valor cerca de 03 (três) % inferior ao traçado modelo dimensionado por Tsutiya (2006). Essa diferença de mais de 128 mil reais demonstra, portanto, a eficácia da utilização do software, visto que ambos os dimensionamentos seguiram os mesmos parâmetros. O software permite melhor visualização e manipulação de dados, comparado às tabelas em

planilha eletrônica, tornando mais fácil e prático a realização de testes e modificações na rede (que neste trabalho se restringiu a modificações de diâmetros), além de auxiliar no incremento da percepção do projetista.

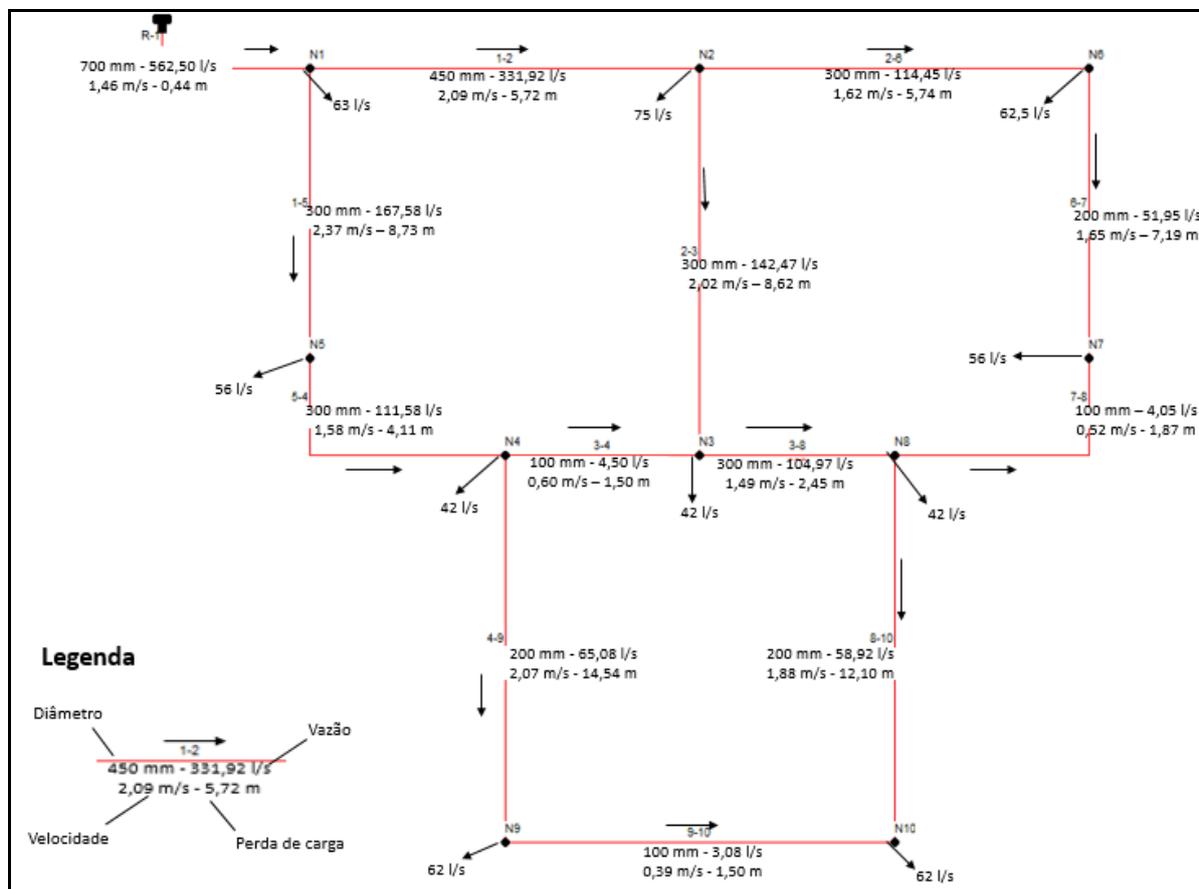
### 3.3.2 EPANET - ABNT

Considerando que a NBR 12218/1994 da ABNT permite utilizar maiores velocidades (0,6 m/s de mínima e 3,5 m/s de máxima), e que maiores velocidades implicam em menores diâmetros de tubulação, reduzindo os custos de aquisição de material para tubulação, realizou-se o dimensionamento no Lenhsnet seguindo os padrões de velocidades da norma mencionada.

O traçado (Figura 4) foi realizado em ambiente EPANET, denominado EPANET - ABNT, e posteriormente dimensionado com a ferramenta de otimização do Lenhsnet (LENHS, 2016). Embora a ferramenta não tenha conseguido atender a todos os parâmetros elencados simultaneamente (velocidades máximas e mínimas, pressão dinâmica mínima conforme ABNT/NBR 12218/1994), efetuou uma nova distribuição de diâmetros, apresentando uma solução de menor custo. Na sequência, realizou-se alguns ajustes nos diâmetros para melhor atendimento as normas.

Os trechos ajustados foram o trecho R-1 (de 1000 mm para 700 mm), pois foi possível reduzir o diâmetro (propondo um traçado mais econômico) sem desprezar os limites de velocidade, e os trechos 3-4 (de 300 mm para 100 mm), e 7-8 (de 150 mm para 100 mm), para aumentar a velocidade no trecho, visto que estavam com valores muito abaixo do recomendado pela norma da ABNT.

Figura 4 – Traçado EPANET - ABNT.



Os valores para análise do traçado com menor custo, ou seja, traçado EPANET - ABNT estão demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Orçamento total, pressões máximas e mínimas nos nós, e velocidades máximas e mínimas da rede, do traçado EPANET - ABNT.

	Orçamento Total (R\$)	Pressão Estática Máxima (mH <sub>2</sub> O)	Pressão Dinâmica Mínima (mH <sub>2</sub> O)	Velocidade Máxima (m/s)	Velocidade Mínima (m/s)
Traçado Modelo	2.009.136,00	63,00	18,56	2,37	0,39

Neste traçado a pressão estática máxima e a velocidade mínima também não atenderam aos limites recomendados pela norma, portanto, em caso de implantação deste projeto, sugerem-se as mesmas recomendações técnicas citadas para o traçado modelo.

Observa-se que a solução proposta pelo software, seguindo os padrões da ABNT, resultou em traçado mais econômico, com menos da metade do custo dos demais traçados, e com valores de pressão estática máxima, pressão dinâmica mínima e velocidades mínimas similares a dos demais traçados, inclusive ao traçado modelo, tendo apenas as velocidades de alguns trechos sendo um pouco superiores. As diferenças mais significativas foram nos trechos 1-2, 2-3, 1-4 e 4-9, que obtiveram valores superiores a 2 m/s.

A grande diferença nos orçamentos pode ser atribuída à utilização de maiores velocidades na rede, fazendo com que uma quantidade de trechos antes dimensionada para tubulação de ferro fundido, passasse a ser de PVC, pois o maior ajuste de diâmetros foi na faixa da troca de materiais, sendo a tubulação de material plástico mais barata.

Essa admissão de maiores velocidades observadas na ABNT/NBR 12218/1994 em relação à tabela de velocidades utilizada por Tsutiya (2006), dentre outras, deve-se ao fato de que na época que a Tabela 2 foi elaborada (1976) não havia normatização para fabricação de materiais para tubulações aplicadas em saneamento básico. As normas de fabricação de materiais, como a de PVC rígido (ABNT/NBR 10570/1988) e de ferro fundido dúctil (ABNT/NBR 7663/1991, revisada em 2002) são mais recentes, assim, por critérios de segurança até então, os projetistas da época optavam por adotar menores velocidades nas redes.

Além disso, na época (1976) utilizavam-se tubulações de material menos resistente, como de cimento amianto, que recentemente estão sendo substituídas por tubulações de materiais plásticos, que tiveram grande evolução nos últimos anos por serem econômicos e resistentes, como o PVC e o PEAD.

#### 4. CONCLUSÕES

No estudo realizado, concluiu-se que o melhor traçado foi o EPANET - ABNT, visto que apresentou parâmetros de bom funcionamento similar aos dos demais traçados, apresentando o menor custo.

Através dos dimensionamentos realizados conclui-se que a experiência do projetista faz diferença para se obter traçados de rede de abastecimento de água mais econômicos quando se utiliza o método de *Hardy-Cross*. Contudo, com a utilização do módulo Lenhsnet

do software de simulação EPANET para apoio ao dimensionamento, que torna o dimensionamento ágil e com a possibilidade de visualização/simulação instantânea de múltiplos cenários e parâmetros de projeto, mesmo sob a tutela de projetista com pouca experiência, pode-se chegar a soluções econômicas de traçado. Cabe ressaltar que a utilização do software não substitui a experiência e a prática da boa engenharia. O uso da ferramenta computacional, aliada ao conhecimento e bagagem técnica, pode levar a projetos que aliem a dicotomia da busca pela melhor solução técnica a mínimos custos de implantação.

Sugere-se para trabalhos futuros, a comparação das perdas de carga na rede de abastecimento de água, de traçados dimensionados por *Hardy-Cross* e pelo *Lenhsnet*. Sugere-se também estudos para comparar o dimensionado de traçados realizados por *Lenhsnet* com realizados através do *UFC4*.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a SANESUL, por disponibilizar seu boletim de preços de Janeiro/2017.

## REFERÊNCIAS

**ABNT**, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10570*: Tubos e conexões de PVC rígido com junta elástica para coletor predial e sistema condominial de esgoto sanitário – Tipos e dimensões. ABNT, 1988.

\_\_\_\_\_. *NBR 7663*: Tubo de ferro fundido dúctil centrifugado, para canalizações sob pressão - Especificação. ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. *NBR 12218*: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. ABNT, 1994.

**AZEVEDO NETTO, J. M.; ARAUJO, R.; FERNANDEZ, M. F. Y; ITO, A. E.** *Manual de hidráulica*. 8. ed. São Paulo - Bluchet, 1998.

**BEZERRA, S. T. M.; GOMES, H. P.; SANTOS, D. S.; SILVA, J. S. O. P.; MONTENEGRO, L. L. B.** *Otimização Econômica para a Reabilitação de Rede de Distribuição, Considerando a Instalação de Boosters*. VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa, 2006.

**BRASIL**. Ministério da Saúde. Portaria n. 2914, de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011.

**CAIXA**. CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI-WEB: *O que é SINAPI ?*. 2017. Disponível em: <[http://www1.caixa.gov.br/gov/gov\\_social/municipal/assistencia\\_tecnica/produtos/repasses/mobilidade\\_urbana/pre\\_contratual/sinapi.asp](http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/assistencia_tecnica/produtos/repasses/mobilidade_urbana/pre_contratual/sinapi.asp)>. Acesso em abr. 2018.

**JUSTINO, J. D.; NOGUEIRA, E.** *Estudo e análise de um sistema de distribuição de água: aplicação do método de Hardy Cross utilizando a equação universal de Darcy-Weisbach e o método de Hazen-Williams*. Cadernos UniFOA, v.22, 2013. p.25-35. Disponível em: <<http://web.unifoa.edu.br/cadernos/edicao/22/25-35.pdf>>. Acesso em set. 2018.

**LENHS**, Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. *Epanet: LENHSNET*. Disponível em: <[http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page\\_id=144](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=144)>. Acesso em jul. 2018.

\_\_\_\_\_. *Epanet*. Disponível em: <[http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page\\_id=32](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=32)>. Acesso em abr. 2018.

**MAIA JUNIOR, J. V. F.** *Comparação de métodos de dimensionamento em redes de distribuição de água*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2012.

**PORTO, R. de M.** *Hidráulica Básica*. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

**SANESUL**, Empresa de Saneamento Básico de Mato Grosso do Sul. *Boletim de Preços Janeiro/2017 com desoneração*. Gerência de projetos - Setor de Orçamentos da SANESUL, 2017.

**SAINT-GOBAIN**. *Linha de Adução de água*. Catálogo, 2006. Disponível em: <[http://files.negociol.com/1257\\_aguaport.pdf](http://files.negociol.com/1257_aguaport.pdf)>. Acesso em jun. 2018.

**SINAPI**, Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. *PCI.817.01 – Custo de Composição Sintético, Versão 00*. 2017.

**TSUTIYA, M. T.** *Abastecimento de água*. 3. ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.