



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

Jônata Ferreira de Melo

**APLICAÇÃO DA TEORIA DOS GRAFOS E SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES  
HIDRÁULICAS INDUSTRIAIS**

**Orientadora: Nadège Sophie Bouchonneau da Silva**

**Coorientador: José Claudino de Lira Júnior**

RECIFE

2013

Jônata Ferreira de Melo

**APLICAÇÃO DA TEORIA DOS GRAFOS E SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES  
HIDRÁULICAS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Materiais e Fabricação, do programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, área de Materiais e Fabricação, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientadora: Nadège Sophie Bouchonneau da Silva

Coorientador: José Claudino de Lira Júnior.

RECIFE

2013

Catálogo na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- M528a Melo, Jônata Ferreira de.  
Aplicação da Teoria dos Grafos e Simulação Computacional para dimensionamento de redes hidráulicas industriais / Jônata Ferreira de Melo – Recife: O Autor, 2013.  
122f. il., figs., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva  
Coorientador: Prof. José Claudino de Lira Júnior
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.  
Inclui Referências e Apêndice.
1. Engenharia Mecânica. 2. Teoria dos Grafos. 3. Simulação . 4. Custos. 5. Redes Hidráulicas. 6. Dimensionamento de Bombas I. Silva, Nadège Sophie Bouchonneau (Orientadora). II. Lira Júnior, José Claudino (Coorientador). III. Título.

“APLICAÇÃO DA TEORIA DOS GRAFOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL  
PARA DIMENSIONAMENTO DE REDES HIDRÁULICAS INDUSTRIAIS”

JÔNATA FERREIRA DE MELO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

---

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> NADÈGE SOPHIE BOUCHONNEAU DA SILVA  
ORIENTADORA/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR  
CO-ORIENTADOR

---

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ  
VICE-COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> NADÈGE SOPHIE BOUCHONNEAU DA SILVA (UFPE)

---

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR

---

Prof. Dr. JOSÉ MARIA ANDRADE BARBOSA (UFPE)

---

Prof. Dr. MÁRIO AUGUSTO BEZERRA DA SILVA (UFPE)

Dedico este trabalho aos meus pais e a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação como profissional e acima de tudo como ser humano.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais pela educação e pelo incentivo na infindável busca pelo conhecimento.

Agradeço também a PETROBRÁS que por meio de seu programa de formação de recursos humanos proporcionou todo o aporte financeiro para que a realização deste trabalho fosse possível.

Ao professor Maurílio José dos Santos, por ter me acolhido e me aconselhado a participar do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da UFPE. À professora Nadège Sophie Bouchoanneau da Silva, por ter aceito o desafio de assumir a orientação de um trabalho em andamento e por estar sempre empenhada e disponível para sanar todas as dúvidas. Ao professor José Claudino Lira Júnior pela oportunidade de conhecer mais sobre a área de projetos e pela orientação, não apenas no âmbito acadêmico, mas também no profissional, por meio de sua competência, profissionalismo e dedicação, dada sua correria cotidiana.

Agradeço também ao professor José Maria Andrade Barbosa, que à frente da coordenação do programa de formação de recursos humanos da Petrobrás tornou possível este trabalho.

Peço desculpas aqueles que não tiveram seus nomes mencionados, mas que contribuíram para a concretização desta dissertação.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”  
(Arthur Shopenhauer)

## RESUMO

Este trabalho propõe a utilização da teoria dos grafos e simulação computacional para analisar redes hidráulicas industriais, isto com o intuito principal de reduzir o tempo despendido na simulação dos cenários propostos. Esta metodologia é baseada principalmente em sete etapas: converter a rede hidráulica em um grafo correspondente, sistematizar o cálculo das perdas de carga para cada trecho; automatizar a análise do grafo no MATLAB®; analisar o resultado do ponto hidráulicamente mais desfavorável; elaborar de acordo com o ponto hidráulicamente mais desfavorável, novos cenários alterando parâmetros como diâmetro das tubulações; dimensionar bomba para os cenários viáveis e analisar o custo de cada cenário proposto. Com este método de análise as simulações dos diversos cenários puderam ser realizadas em poucos minutos. A agilidade na elaboração e decisão envolvidas na etapa de projeto é essencial para que a etapa de construção e montagem providencie os recursos com mais antecedência o que dá uma folga maior para absorver os imprevistos da construção e montagem.

**Palavras-chave:** Teoria dos Grafos. Simulação. Custos. Redes hidráulicas. Dimensionamento de bombas.

## **ABSTRACT**

This work proposes the utilization of graph's theory and computational simulation to analyze industrial hydraulic networks, with the aim to reduce the time spent for the simulation of some scenarios. The methodology is based on seven steps: conversion of the hydraulic network into a corresponding graph. Systematization of the load loss for each part. Programming of the graph in MATLAB<sup>®</sup> software. Analysis of the results of the less favorable hydraulic point, make new scenarios according to the less favorable hydraulic point (changing parameters as pipe diameter). Dimensioning the pump for the feasible scenarios and analysis of the cost of each proposed scenarios. With this analysis method, the simulation of the scenarios could be performed in a few minutes. The agility of the construction and decisions of each project step is essential, in order to provide the resources as fast as possible and absorb problems that may come with the construction and mounting steps.

**Keywords:** Graph Theory. Simulation. Cost. Hydraulic networks. Sizing of pumps.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Proporção das demandas por água entre os diversos setores .....	16
Figura 4.1 Problema das sete pontes de Königsberg.....	27
Figura 4.2 Grafo correspondente do problema das sete pontes de Königsberg .....	28
Figura 4.3 Grafo do jogo “ao redor do mundo” e sua solução (caminho Hamiltoniano) .....	29
Figura 4.4 Grafo ponderado não direcionado.....	33
Figura 4.5 Exemplo de busca em largura.....	35
Figura 4.6 Exemplo de busca em profundidade .....	36
Figura 4.7 Aplicação do algoritmo de Dijkstra .....	39
Figura 4.8 Exemplo de rede do tipo ramificada .....	41
Figura 4.9 Exemplo de rede do tipo malhada.....	41
Figura 5.1 Perfis de velocidade e variação da pressão num duto fechado totalmente cheio.....	43
Figura 5.2 Diagrama de Moody .....	46
Figura 5.3 Exemplo de rede hidráulica .....	49
Figura 5.4 Exemplo de rede hidráulica com pontos marcados .....	49
Figura 5.5 Interface do programa .....	51
Figura 5.6 Interface do programa em destaque para o texto apresentado.....	51
Figura 5.7 Grafo correspondente ao sistema hidráulico analisado.....	52
Figura 5.8 Solução da perda de carga máxima encontrada pelo programa .....	53
Figura 5.9 Solução do caminho hidráulicamente mais desfavorável encontrado pelo programa.....	54
Figura 5.10 Funcionamento geral do programa .....	55
Figura 6.1 Rede hidráulica analisada na metodologia inserida no ambiente do EPANET 2.0 .....	60
Figura 6.2 Gráfico Comparativo dos resultados das perdas de carga obtidos pelos dois métodos .....	61
Figura 6.3 Gráfico Comparativo das perdas de carga acumuladas obtidas pelos dois métodos.....	62
Figura 7.1 Rede hidráulica do estudo de caso .....	63
Figura 7.2 Fluxograma do programa desenvolvido .....	67
Figura 7.3 Rede hidráulica do estudo de caso com pontos marcados .....	68

Figura 7.4 Grafo correspondente gerado pelo programa .....	71
Figura 7.5 Caminho hidraulicamente mais desfavorável encontrado pelo programa	73
Figura 7.6 Rede hidráulica com caminho hidraulicamente mais desvorável em destaque.....	74
Figura 7.7 Caminho hidraulicamente mais desfavorável encontrado para rede com tubulação de 6 polegadas .....	75
Figura 7.8 Caminho hidraulicamente mais desfavorável para tubulação de 6 polegadas.....	76
Figura 7.9 Caminho hidraulicamente mais desfavorável para tubulação com diâmetro misto.....	77
Figura 7.10 Caminho hidraulicamente mais desfavorável para tubulação com diâmetro misto .....	78
Figura 7.11 Planilha de cálculo das perdas de carga.....	80
Figura 7.12 Gráficos da relação entre custo da bomba e o custo da tubulação para os cenários propostos .....	82
Figura 7.13 Gráfico comparativo dos custos da tubulação dos cenários propostos..	83
Figura 7.14 Rede hidráulica do estudo de caso inserida no ambiente do EPANET 2.0 .....	84
Figura 7.15 Caminhos possíveis para escoamento do fluido até o ponto hidraulicamente mais desfavorável .....	85
Figura 7.16 Caminho até o ponto hidraulicamente mais desfavorável encontrado pelo programa .....	86
Figura 7.17 Gráfico das perdas de carga acumuladas encontradas pelo EPANET 2.0 .....	87
Figura 7.18 Gráfico das perdas de carga acumulada encontrada pela planilha .....	88
Figura 7.19 Caminho até o ponto N54 .....	89
Figura 7.20 Dispersão dos dados da perda de carga acumulada .....	90
Figura 7.21 Curva característica de uma bomba centrífuga.....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Matriz adjacência.....	33
Tabela 4.2 Matriz incidência.....	34
Tabela 5.1 Caracterização do regime de escoamento .....	44
Tabela 5.2 Valores dos coeficientes de perda de carga localizada (K) .....	48
Tabela 5.3 Vetores e pesos.....	50
Tabela 6.1 Comparativo dos métodos.....	62
Tabela 7.1 Vazões e pressões requeridas .....	64
Tabela 7.2 Resultados dos cenários de simulação .....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{A}$	Vetor das origens
$A$	Matriz adjacência
$\bar{B}$	Vetor dos destinos
$B$	Matriz incidência
$\bar{C}$	Vetor dos pesos
$d$	Diâmetro da tubulação (m)
$D$	Diâmetro do tubo (m)
$D_{\text{externo}}$	Diâmetro externo do tubo (m)
$d_{\text{interno}}$	Diâmetro interno do tubo (m)
$f$	Fator de atrito de Darcy (Adimensional)
$g$	Aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ )
$G$	Grafo
$h$	Perda de carga total (mca)
$h_{\text{atm}}$	Altura atmosférica (mca)
$H_{\text{estática}}$	Altura manométrica estática (mca)
$H_{\text{gs}}$	Altura geométrica de sucção (mca)
$H_{\text{manométrica}}$	Altura manométrica (mca)
$H_{\text{perdas}}$	Altura manométrica das perdas (mca)
$H_{\text{recalque}}$	Altura manométrica de recalque (mca)
$H_{\text{sucção}}$	Altura manométrica da sucção (mca)
$h_v$	Carga hidráulica correspondente à pressão de vapor do líquido bombeado (m)
$K$	Coefficiente de perda de carga localizada (adimensional)
$L$	Comprimento da tubulação (m)

$\ln$	Logaritmo neperiano
NPSH	Net Positive Suction Head (mca)
$p$	Energia de pressão (mca)
$P_{\text{mangueira}}$	Perda de carga da mangueira (mca)
$P_{\text{ot}}$	Potência (cv)
$P_{\text{útil}}$	Pressão de trabalho (mca)
$Q$	Vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$R_e$	Número de Reynolds (Adimensional)
$V$	Velocidade do fluido (m/s)
$z$	Energia de posição (m)
$\gamma$	Peso específico do fluido ( $\text{N}/\text{m}^2$ )
$\varepsilon$	Rugosidade (m)
$\eta$	Rendimento (%)
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^*\text{s}$ )
$\rho$	Massa específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_{\text{aço}}$	Densidade do aço ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Delimitação do problema.....	17
2	Justificativa .....	18
3	Objetivos.....	19
3.1	Objetivo geral .....	19
3.2	Objetivos específicos .....	19
4	Fundamentação teórica .....	20
4.1	Evolução dos métodos de análise de redes hidráulicas.....	20
4.2	O EPA e o EPANET .....	23
4.3	Algoritmos genéticos na análise de redes hidráulicas.....	25
4.4	Pesquisa operacional e teoria dos grafos .....	26
4.5	Teoria dos grafos .....	27
4.6	Representação numérica dos grafos.....	32
4.7	Algoritmos de busca em grafos.....	34
4.8	Tipologia das redes .....	40
5	Metodologia .....	42
5.1	Planilha de cálculos.....	42
5.1.1	Cálculo das perdas de carga .....	44
5.2	Convertendo uma rede em grafo.....	48
5.2.1	Gerando o grafo no MATLAB® .....	50
5.3	Funcionamento do programa .....	54
5.4	Dimensionamento da bomba.....	55
5.5	Cálculo do custo da tubulação .....	58
6	Validação.....	60
6.1	Validando usando o EPANET 2.0 .....	60
6.1.1	Resultados obtidos .....	61

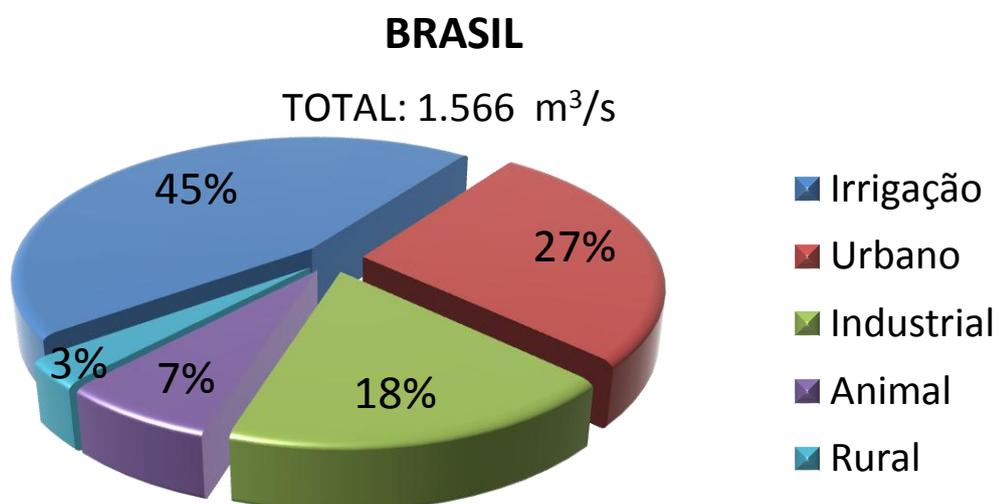
7	Estudo de Caso .....	63
7.1	Determinação da vazão e pressão de operação .....	64
7.2	Modelagem.....	65
7.2.1	Elaboração do grafo correspondente.....	68
7.2.2	Cálculo dos pesos (perdas de carga) .....	78
7.3	Dimensionamento das bombas .....	81
7.4	Resultados obtidos.....	81
7.5	Simulação usando o EPANET 2.0.....	84
7.6	Análise dos resultados .....	89
8	Conclusões .....	93
8.1	Proposta para trabalhos futuros .....	94
	Referências .....	95
	Apêndices.....	98
	APÊNDICE A: FIGURAS.....	98
	APÊNDICE B: Cenários de simulação do EPANET 2.0 .....	108
	APÊNDICE C: Planilha de cálculo das perdas de carga do estudo de caso (completa) .....	111
	ANEXO A: Cotação das bombas consideradas no estudo.....	114

## 1 Introdução

A água é sem sombra de dúvidas um dos recursos fundamentais para a manutenção da vida como a conhecemos hoje. Apesar da Terra ser um planeta onde 70,8% de sua superfície é coberta de água, apenas 2,2% é de água doce, dos quais estão disponíveis para consumo apenas 0,3%. De acordo com o relatório executivo da ANA (Agência Nacional de Águas, 2007) estima-se que em 2025 o número de pessoas que vivem em países submetidos a grandes pressões sobre os recursos hídricos passará de cerca de 700 milhões para mais de 3 bilhões. Atualmente mais de 1,4 bilhão de pessoas vivem em regiões onde a demanda pela água das bacias hidrográficas supera os níveis mínimos de reposição, o que implica no esvaziamento dos rios e no esgotamento das águas subterrâneas. O Brasil detém 60% da bacia amazônica, o que representa 1/5 da água doce disponível em todo o planeta, porém este é um diferencial que traz consigo a responsabilidade de gerenciar este recurso de forma sustentável. Segundo Marchi e Simpson (2013), o aumento dos custos de energia e a preocupação com a sustentabilidade ambiental têm impulsionado a poupança de energia.

A figura 1.1 mostra a relação percentual entre os diversos setores da economia e o consumo de água no Brasil.

**Figura 1.1 Proporção das demandas por água entre os diversos setores**



Nota-se que o consumo industrial é bastante significativo no consumo deste recurso tão importante para os diversos setores da economia. O setor industrial já protagonizou lamentáveis episódios de mau uso da água, bem como contaminação de rios e acidentes ambientais de um modo geral. No entanto, a legislação brasileira vem ao longo dos anos fiscalizando cada vez mais com rigor a atividade de muitas indústrias. O governo vem promovendo medidas de incentivo para atrair empreendimentos industriais para todo o país, visando a uma redução no índice de desemprego e conseqüentemente um crescimento econômico mais acentuado, o qual tem atraído a atenção de investidores do mundo inteiro.

O setor industrial utiliza a água em seus parques de diversas formas: seja como água de processo; água para torres de resfriamento; sistema de água gelada; redes de combate à incêndio, etc. Dependendo da atividade da indústria podem-se ter usos distintos desse recurso. As redes hidráulicas estão presentes na grande maioria das indústrias, como um sistema complexo e fundamental para o desenvolvimento da sua atividade fim. Este trabalho visa a contribuir para a análise de redes hidráulicas industriais por meio de uma metodologia que utiliza a teoria dos grafos com o intuito de melhorar o dimensionamento desses sistemas, de modo que eles sejam operacionais, seguros e econômicos.

O trabalho foi dividido em oito capítulos. Os cinco primeiros visam: justificar a importância de sua realização, esclarecer os objetivos. Apresentar os principais métodos utilizados para a resolução dos problemas da mesma classe e a metodologia empregada no trabalho. Em seqüência os dois últimos capítulos visam a validar a metodologia por meio de uma aplicação em um estudo de caso e as conclusões trazendo as principais vantagens da utilização do método bem como os pontos de melhoria.

## **1.1 Delimitação do problema**

Este trabalho visa a responder a seguinte indagação:

Como calcular os pontos hidráulicamente mais desfavoráveis numa rede hidráulica e avaliar o menor custo associado a cada cenário?

## 2 Justificativa

Atualmente as informações e o mundo de um modo geral estão em um ritmo cada vez mais frenético, onde dados precisos e ou meras especulações podem influenciar decisões de governos, empresas e de pessoas comuns. O Brasil passa neste momento por várias intervenções estruturadoras, com altos investimentos em obras de infraestrutura. Isto faz com que haja a necessidade de evolução da tecnologia de gestão, o que implica no surgimento de formas mais eficientes de realizar as atividades.

Uma das etapas mais importantes para a construção de um empreendimento ou obra pública é, a etapa de projeto, pois ela envolve um planejamento, onde todas as informações necessárias acerca do empreendimento são agrupadas e analisadas, visando minimizar os imprevistos. Eles são verdadeiros vilões, causando incrementos no custo e no tempo de execução das obras. Em alguns casos eles causam danos à saúde e à vida de operadores e/ou usuários do produto ou sistema.

As instalações hidráulicas são essenciais para a maioria dos empreendimentos, e em muitos casos a distribuição espacial das tubulações influenciam nas demais etapas do projeto. É necessário que tais análises sejam realizadas de forma cada vez mais rápida e sistemática. Como encontrar o ponto hidráulicamente mais desfavorável de uma rede hidráulica? Como avaliar o impacto no custo de alterações como: diâmetro das tubulações e rotas da tubulação? E a última e talvez a mais importante de todas: como responder e obter todos estes cenários de forma ágil? Essas perguntas traduzem de forma simples as necessidades fundamentais que envolvem o dimensionamento de redes hidráulicas. Quanto menor for o tempo para responder às indagações dos investidores, mais rápidas serão as decisões e desta forma maior o tempo para refino das análises, o que contribui para uma maior qualidade do projeto que conseqüentemente culmina em menos dúvidas e imprevistos na execução, evitando assim incrementos nos custos e nos prazos.

Visando a responder às indagações supracitadas foi necessário o desenvolvimento de uma ferramenta que oferecesse uma linguagem simples e versátil, capaz de fornecer o resultado esperado com o mínimo de informações de entrada.

O programa desenvolvido se destina a resolver o problema proposto por meio da abordagem deste via teoria dos grafos. Ele foi escrito em linguagem MATLAB<sup>®</sup> com 40 linhas de comando, responsáveis por conferir uma interface amigável para facilitar a modelagem do problema. As principais vantagens da abordagem proposta são: facilidade para manipulação dos dados; Não é necessária a modelagem de elementos como bomba e reservatório; Interface objetiva; Facilidade para simular novos cenários e agilidade na resposta.

### **3 Objetivos**

Os objetivos visam informar o que se pretende alcançar com a elaboração deste trabalho.

#### **3.1 Objetivo geral**

Desenvolver uma forma sistemática e confiável de analisar redes hidráulicas, utilizando simulação computacional, que traga resultados satisfatórios, em facilidade e agilidade na tomada de decisão.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Visando atingir o objetivo geral, os objetivos específicos que norteiam a busca pelo resultado esperado foram divididos nos sete objetivos listados a seguir:

- Sistematizar o cálculo das perdas de carga para cada trecho;
- Converter a rede hidráulica em um grafo correspondente;
- Automatizar a análise do grafo no MATLAB<sup>®</sup>;
- Analisar o resultado do ponto hidráulicamente mais desfavorável;
- Elaborar, de acordo com o ponto hidráulicamente mais desfavorável, novos cenários alterando parâmetros como o diâmetro das tubulações;
- Dimensionar a bomba para os cenários viáveis e
- Analisar o custo de cada cenário proposto.

## **4 Fundamentação teórica**

As redes hidráulicas são indispensáveis para diversos setores da sociedade, desde o abastecimento urbano ao de equipamentos em indústrias de manufatura. Ao longo dos anos tanto os materiais empregados na construção das redes hidráulicas, como as técnicas para análise delas, têm evoluído bastante. De acordo com Azevedo Netto e Alvarez (1985, apud ROSAL, 2007, p.21) o sistema hidráulico nada mais é do que um conjunto de obras, equipamentos e serviços que se destinam a atender uma demanda de água. Ou seja, é um sistema que transporta água de um reservatório para diversos pontos de consumo, atendendo a essas necessidades de modo a garantir uma vazão suficiente e uma pressão adequada no ponto desejado.

Dependendo da escala de transporte da água, bem como de sua utilização, atualmente utilizam-se tubulações de diversos materiais, como concreto, PVC, ferro fundido e aço carbono. Pode-se também definir se o sistema será pressurizado pela simples ação da pressão atmosférica, como nos aquedutos antigos, ou se o sistema será pressurizado por meio de bombas. Conforme o sistema de abastecimento cresce se forma uma rede cada vez mais complexa de tubulações o que torna cada vez mais complicada a análise dessas redes. É necessária a elaboração de métodos mais eficazes e eficientes de análise visando racionalizar o uso, minimizar perdas e/ou garantir os parâmetros operacionais da rede. A análise das redes por meio de métodos numéricos confere ao projetista uma maior previsibilidade do funcionamento dela, assim como prever manobras em casos de manutenção, quebra e vazamentos.

Segundo Jun e Guoping (2013), modelos de rede hidráulicas são amplamente utilizados como ferramentas para simular sistemas de distribuição de água, não só na pesquisa acadêmica, mas também por empresas que trabalham com água em seu dia-a-dia. Existem muitos tipos de pacotes de modelagem, desenvolvidos para analisar o desempenho dos sistemas de distribuição de água.

### **4.1 Evolução dos métodos de análise de redes hidráulicas**

Hoje em dia há muitos métodos que se propõem a analisar redes hidráulicas. Alguns mais complexos que outros, no entanto é importante ressaltar que assim como existem problemas distintos, também há soluções distintas para um mesmo

problema, entretanto a solução mais adequada é aquela que é capaz de fornecer uma mesma solução, utilizando uma menor quantidade de recursos, como por exemplo, o tempo de processamento. Conforme afirmam Formiga e Chaudhry (2008), pelo fato das equações dos problemas não serem lineares, este só pode ser resolvido diretamente em algumas situações especiais. No entanto, na maioria dos casos, é preciso empregar métodos iterativos assumindo uma solução aproximada a cada passo até que o problema tenha sido resolvido. Tais métodos podem ser classificados da seguinte forma:

- a) Gradiente local;
- b) Newton Raphson;
- c) Linearização;
- d) Minimização numérica e
- e) Métodos híbridos.

Um dos primeiros métodos para análise de redes de distribuição foi desenvolvido por um engenheiro estrutural estadunidense chamado Hardy Cross em 1936. É o método da distribuição dos momentos ou simplesmente, método Hardy Cross. É um método iterativo em que a rede é subdividida em anéis, onde são realizados sucessivos balanços energéticos e de massa (gradiente local) a fim de atingir o equilíbrio da malha estudada. Um dos principais problemas deste método é que sua eficiência se baseia na escolha inicial da malha, ou seja, o método se comporta de forma instável. Dependendo desta escolha, assim como do número de malhas, o método pode não convergir com a mesma eficiência numérica em decorrência da complexidade da rede.

Segundo Shamir e Howard (1968), os métodos que resolvem o sistema de equações não lineares por meio do método Newton-Raphson são mais eficientes que o MHC (método Hardy Cross), no entanto são altamente dependentes de bons valores iniciais para que apresente uma boa taxa de convergência. A falta desses valores fica cada vez mais crítica à medida que aumenta a complexidade da rede.

A terceira classe de métodos são os de linearização de funções. De acordo com Formiga e Chaudhry (2008) o método da teoria linear emprega sucessivas

aproximações para as equações de perda de carga nos trechos o que produz bons resultados. A principal vantagem deste método é que ele não necessita de boas soluções iniciais. No entanto Souza e Chaudhry afirmam que as características já conhecidas do método linear (LTM) e do método Newton-Raphson (NR), foram exploradas na análise de redes hidráulica e que o método NR converge rapidamente (quadraticamente) para estimativas iniciais razoáveis, e tem convergência lenta (linear) ou problemas de não convergência para estimativas grosseiras, não próximas da solução. No método da teoria linear há uma oscilação nas proximidades da solução, mas geralmente é convergente para a solução correta. Quando o método de NR converge, ele o faz mais rapidamente, ou seja, em um número menor de iterações que o método LTM. Por outro lado, o método de NR apresenta mais problemas de convergência do que o método LTM, principalmente devido aos erros relativamente grandes que ocorrem nas primeiras iterações.

Os métodos de minimização numérica, segundo Formiga e Chaudhry (2008), empregam técnicas de análise visando minimizar uma função objetivo não linear e convexa, estando ela sujeita a um conjunto de restrições representadas por equações lineares, que por sua vez são as equações de conservação de massa nos nós e energia nos trechos. A convexidade da função objetivo, combinada com a linearidade das restrições, confere ao método uma vantagem interessante, tendo em vista que esses fatores garantem a existência e unicidade da solução. No entanto a utilização de métodos para análise de redes hidráulicas requer sua aplicabilidade em redes grandes e complexas. Embora se esteja vivendo numa época onde se tem boa capacidade processamento e técnicas cada vez mais avançadas de minimização numérica, estes métodos ainda demandam muito tempo de processamento quando aplicados em redes de grande porte.

Métodos híbridos são interessantes, pois incorporam as principais vantagens de métodos distintos visando melhorar o desempenho deles. Um dos métodos híbridos que é amplamente conhecido e empregado na análise de redes é o do gradiente. Ele emprega técnicas de minimização numérica juntamente com o método Newton-Raphson. De acordo com Rossman (1993, apud LINDELL, 2006, p. 4), o método do Gradiente, foi proposto por Todini e Pilati (1987). Nesta formulação, equações de energia individuais, para cada tubo são combinadas com as equações nodais

individuais para cada nó de junção para fornecer uma solução simultânea para ambas as extremidades dos nós e fluxos de tubos individuais. Semelhante ao "loop simultâneo" e "método linear", as equações não lineares de energia são primeiramente linearizadas usando uma expansão em série de Taylor. No entanto, neste caso, as equações são resolvidas utilizando um esquema eficiente recursivo (método NR) que emprega uma inversão da matriz de coeficientes original.

No final dos anos 1960 e início dos anos 1970 foi um período fértil para o desenvolvimento de algoritmos de análise de redes em várias universidades dos Estados Unidos e em outros países. Na década de 1980, muitos desses programas de "pesquisa" (por exemplo, Fowler, Wood, Jeppson, Sharmir e Howard, Sarikelle) foram convertidos em softwares comerciais, que foram comercializados através de universidades ou através de pequenas empresas e / ou grandes corporações. Das empresas que entraram neste mercado as mais importantes foram, WATSIM, por Boeing Computer Services e FASST, por MCAUTO. Empresas Norte americanas como Stoner Associates, e empresas internacionais como: Expert Development Corporation (WATSYS) WRC (WATNET), Charles Howard e Associates (SPP8) e Safege Consulting Engineers (Piccolo) surgiram também para fornecer modelagem e serviços completos para vários utilitários em todo o mundo. Com o passar dos anos na década de 1990, outras empresas como Haestad Methods (Cybernet) e WHM Soft Inc, começaram a desenvolver os nichos de mercado com ambos os utilitários, menores e maiores, respectivamente. O lançamento pela EPA do EPANET, que foi desenvolvido por Lewis Rossman, em 1993, na condição um modelo de distribuição de água abrangente com uma arquitetura livre e aberta. O Epanet tem sido utilizado, e adaptado tanto para a pesquisa quanto para aplicações práticas (Lindell, 2006).

## **4.2 O EPA e o EPANET**

A U.S. Environmental Protection Agency (EPA) é a agência estatal norte-americana encarregada pelo Congresso dos Estados Unidos da América de proteger os seus recursos naturais (terra, ar e recursos hídricos). De acordo com a legislação norte-americana em matéria ambiental, cabe a esta instituição conceber e implementar ações que conduzam a um balanço entre as atividades humanas e a capacidade dos sistemas naturais para suportar e garantir níveis ambientais aceitáveis. Para cumprir este objetivo, o programa de pesquisa da EPA fornece informação de base e

suporte técnico para a resolução de problemas ambientais reais, que permitam construir uma base de conhecimento científico necessária a uma adequada gestão dos recursos ecológicos, e que também permitam ajudar a compreender o modo como os poluentes podem afetar a saúde pública, e prevenir ou minimizar futuros riscos ambientais.

O National Risk Management Research Laboratory , um dos laboratórios da EPA, constitui a unidade principal para a pesquisa de técnicas e metodologias de gestão que permita reduzir os riscos para a saúde humana e o ambiente. Os seus principais objetivos são: o desenvolvimento de metodologias de prevenção e controle da poluição do ar, terras e recursos superficiais; a proteção da qualidade da água em sistemas públicos de abastecimento; o melhoramento das condições ambientais de locais contaminados e de aquíferos subterrâneos; e a prevenção e controle da poluição do ar em recintos fechados. As principais funções desta unidade de pesquisa são: desenvolver e implementar tecnologias ambientais inovadoras e economicamente viáveis; desenvolver informação científica e de engenharia, necessárias à EPA para apoio à decisão no âmbito de regulamentos e de políticas; e, ainda, fornecer suporte técnico e proporcionar a transferência de informação que assegure a implementação eficaz de decisões e regulamentações ambientais.

De forma a satisfazer os requisitos regulamentares e as necessidades dos consumidores, as entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água sentem a necessidade de compreender melhor os movimentos e transformações que a água destinada ao consumo humano está sujeita através dos sistemas de distribuição. O EPANET é um modelo automatizado de simulação que ajuda a atingir este objetivo. Permite simular o comportamento hidráulico e de qualidade da água de um sistema de distribuição sujeito a diversas condições operacionais, durante um determinado período de funcionamento.

O EPANET é, indiscutivelmente, o programa de modelagem hidráulica e de qualidade de água mais empregado no mundo; é encontrado em versões nos principais idiomas e seu número de usuários aumenta, exponencialmente, devido a sua facilidade de uso e por ser um programa disponibilizado gratuitamente. (Gomes e Salvino, 2009).

### 4.3 Algoritmos genéticos na análise de redes hidráulicas

Os algoritmos genéticos vêm se tornando cada vez mais presentes na solução de problemas modernos da engenharia, isto devido à crescente necessidade de uma maior acurácia nos resultados, o que demanda na maioria das vezes, a consideração de um número cada vez maior de variáveis. Tebcharani (2007) afirma que os algoritmos genéticos envolvem processos estocásticos de busca que são baseados nos sistemas adaptativos da natureza, no que tange à evolução das espécies. Conforme Gudwin (1999) esses algoritmos correspondem a uma família de métodos adaptativos que são muito utilizados para solucionar problemas de busca e otimização. De acordo com Tebcharani (2007) os algoritmos genéticos manipulam possíveis soluções para a rede em busca de um custo mínimo de um modo semelhante ao que a natureza faz quando combina cromossomos na busca de uma melhor adaptação. No entanto a necessidade do aumento da confiabilidade destes sistemas vêm ganhando cada vez mais peso nas decisões de investimento. Com o surgimento desta necessidade cada vez mais presente nos projetos, os modelos adaptativos precisaram sofrer algumas atualizações, as quais efetuadas nos algoritmos deram origem aos algoritmos genéticos multiobjetivos.

Segundo Kurek e Ostfeld (2012), a maioria dos problemas é de natureza contraditória ou multiobjetivo. O objetivo mais comum de uma análise de engenharia é selecionar as melhores compensações entre objetivos concorrentes. Frequentemente, tais problemas são estruturados como problemas com objetivos individuais agregando todos os objetivos em um único, a minimização ou maximização de uma função objetivo. Este tipo de análise pode ser benéfico para a obtenção de possibilidades de solução para o problema considerado. No entanto, não é adequado quando há um compromisso claro entre os objetivos utilizados. Contrariamente a isso, em uma formulação do tipo multiobjetivo, não há solução ótima, mas conjuntos de soluções não dominadas que formam um pareto com todos os objetivos.

Segundo Carrijo (2007) os principais algoritmos genéticos multiobjetivos são:

- SPEA e SPEA II (Strength Pareto Evolutionary Algorithm – 1998 / 2001)
- PAES (Pareto Archived Knowles - 1999)

- PESA e PESA II (Pareto Envelope based Selection Algorithm – 2000 / 2001)
- NSGA II ( Nondominated Sorting Genetic Algorithm - 2002)

Existem outros algoritmos genéticos. Segundo Pacheco (1999), há vários algoritmos inteligentes como: redes neurais artificiais, lógica Fuzzy e sistemas especialistas. Além da utilização de algoritmos genéticos na resolução de problemas de análise de redes hidráulicas, existem outros campos da pesquisa operacional dedicados a modelagem de problemas deste tipo. Segundo Rosal (2007), dentre as técnicas de pesquisa operacional empregadas para resolução de problemas de rede destacam-se: a programação linear, a programação não linear, a programação linear inteira mista, a programação não linear inteira mista e a programação dinâmica.

#### **4.4 Pesquisa operacional e teoria dos grafos**

Segundo Hillier e Lieberman (2010), o termo pesquisa operacional é atribuído inicialmente às ações militares no início da segunda guerra mundial. Durante a guerra havia a necessidade da alocação de recursos escassos de forma eficiente para o êxito de diversas operações militares. Devido a essa necessidade os exércitos norte americano e britânico convocaram um grande número de cientistas para lidar com esses e outros problemas táticos e estratégicos. O termo surgiu pois, a estes cientistas foi incumbida a tarefa de desenvolver pesquisas sobre operações militares.

A pesquisa operacional é aplicada em diversas áreas, como: manufatura, transporte, telecomunicações, planejamento financeiro, assistência médica, serviços públicos, etc. As fases usuais de um estudo de pesquisa operacional são as seguintes:

- Definir o problema de interesse e coletar dados;
- Formular um modelo matemático para representar o problema;
- Desenvolver um procedimento computacional a fim de derivar soluções para o problema com base no modelo;
- Testar o modelo e aprimorá-lo conforme necessário;
- Preparar-se para aplicação contínua do modelo e
- Implementá-lo.

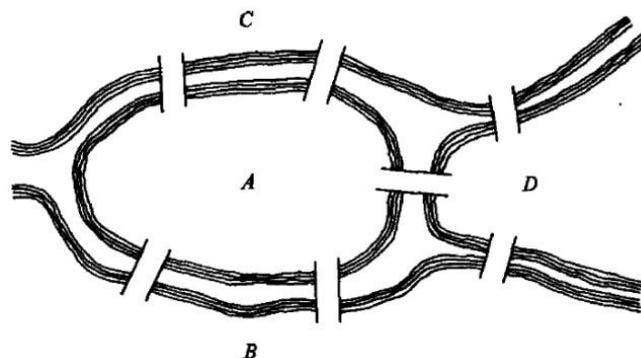
Segundo Goldberg e Luna (2005), a pesquisa operacional é capaz de trazer soluções para problemas como: problemas de mix de produção; de conexão (árvores, caminhos e emparelhamento); de fluxo em redes, logística e distribuição; de roteamento, etc.

Em pesquisa operacional a teoria dos grafos é utilizada para resolução de problemas de otimização combinatória. Segundo Bouznif et al. (2012), em teoria dos grafos, na pesquisa operacional e otimização combinatória, a maioria dos problemas estudados são NP-difícil<sup>1</sup>. No entanto, alguns deles tornam-se mais fáceis se seu estudo é restrito a determinadas subclasses do grafo (árvores, grafos planares, árvore do grafo, etc). Entre as categorias de problemas resolvidos por meio de grafos, redes são amplamente estudadas na literatura. Vários problemas NP-difíceis mostram-se muito mais fáceis de tratar quando abordados por meio da teoria dos grafos.

#### 4.5 Teoria dos grafos

A teoria dos grafos tem atualmente muitas aplicações, apesar de já ter quase três séculos de existência. Segundo Harary( 1969), Euler (1707-1782) tornou-se o pai da teoria dos grafos, bem como da topologia, quando em 1736 se propôs a resolver um famoso problema ainda não resolvido de sua época, chamado o problema das sete pontes de Königsberg. Havia duas ilhas ligadas umas às outras e para as margens do rio Pregel por sete pontes, como mostrado na figura 4.1.

**Figura 4.1 Problema das sete pontes de Königsberg**

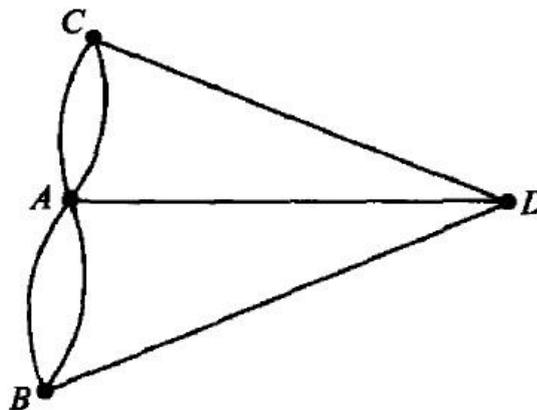


**Fonte: HARARY, F.; Graph theory, 1969**

<sup>1</sup> O termo NP é um acrônimo em inglês Non-deterministic Polynomial time. Na teoria da complexidade computacional este prefixo denota um conjunto de problemas que são decidíveis em tempo polinomial por uma máquina de Turing não-determinística.

O problema era passar por todas as pontes sem passar duas vezes por nenhuma delas. Pode-se facilmente tentar resolver este problema de forma empírica, mas não terá êxito em nenhuma das tentativas. Para provar que o problema é insolúvel, Euler substituiu cada área de terra por um ponto e cada ponte por uma linha que une os pontos correspondentes, produzindo assim um "grafo". Este grafo é mostrado na figura 4.2, em que os pontos são rotulados para corresponder às quatro áreas de terra da figura 4.1. Mostrar que o problema não tem solução é equivalente a mostrar que o grafo da figura 4.2 não pode ser percorrido de uma determinada maneira.

**Figura 4.2 Grafo correspondente do problema das sete pontes de Königsberg**



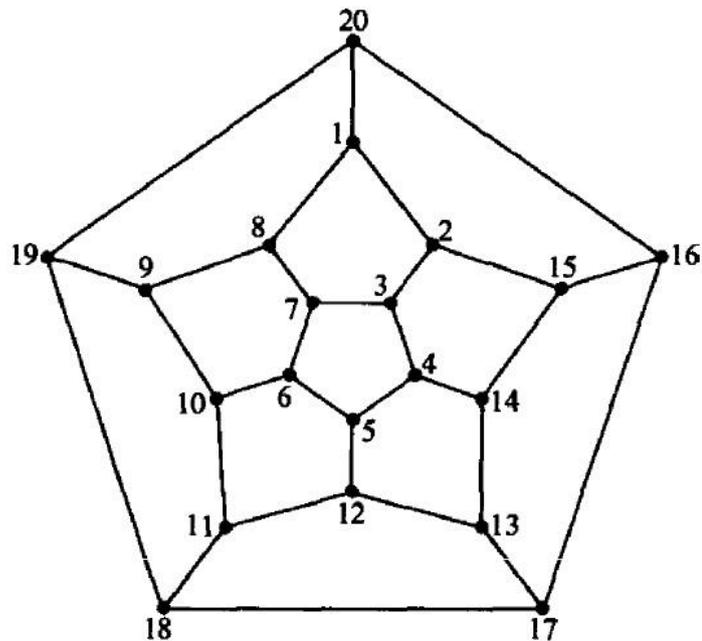
Fonte: HARARY, F.; Graph theory, 1969

Euler percebeu que só seria possível atravessar o caminho completo passando uma única vez por cada ponte se houvesse zero ou dois pontos com um número ímpar de caminhos. Ele deduziu isso, pois percebeu que era necessário um caminho para chegar ao ponto e outro para sair do ponto. Os únicos pontos onde essa condição não era necessária seriam nos pontos de início e fim do percurso, caso contrário o percurso deveria ser iniciado e finalizado no mesmo ponto. Desta forma surgiram os caminho e circuito Euleriano. O caminho Euleriano é o caminho que percorre todas as aresta de um grafo passando por cada uma 1 única vez. Já o circuito Euleriano é quando este caminho se inicia e finaliza num mesmo vértice.

Em 1859 Sir William Hamilton inventou um jogo onde ele usa um dodecaedro regular de sólido cujos 20 vértices são rotulados com os nomes de cidades famosas. O jogador é desafiado a viajar "ao redor do mundo", encontrando um circuito fechado ao longo das bordas que passa por cada vértice exatamente uma vez. Hamilton

vendeu sua ideia a um fabricante de jogos para 25 guinéus, este foi um movimento astuto tendo em vista que o jogo não foi um sucesso financeiro. A figura 4.3 a seguir, apresenta o referido grafo.

**Figura 4.3 Grafo do jogo “ao redor do mundo” e sua solução (caminho Hamiltoniano)**



Fonte: HARARY, F.; Graph theory, 1969

Em termos gráficos, o objetivo do jogo é encontrar um ciclo que abrange o grafo do dodecaedro. Os pontos do grafo são marcados 1,2, ..., 20 (em vez de Amsterdã, Ann Arbor, Berlim, Budapeste, Dublin, Edimburgo, Jerusalém, Londres, Melbourne, Moscou, Novosibirsk, Nova York, Paris, Pequim, Praga, Rio de Janeiro, Roma, São Francisco, Tóquio e Varsóvia), de modo que se torne evidente a existência de um ciclo onde é possível percorrer todos os vértices do grafo sem repetição alguma deles. Desta forma ficou convencionado que caminho Hamiltoniano na teoria dos grafos é o caminho pelo qual percorremos todos os vértices de um grafo passando uma única vez por cada vértice.

Ainda de acordo com Harary (1969) existe um problema na teoria dos grafos chamado: A conjectura das quatro cores. O problema não resolvido mais famoso na teoria dos grafos, e talvez em toda a matemática, seja a famosa conjectura das quatro cores. Este problema pode ser explicado de forma clara em cinco minutos para qualquer matemático e para qualquer homem comum. Ao fim da explicação,

ambos irão compreender o problema, mas também não serão capazes de resolvê-lo. O problema consiste em: Qualquer mapa visto de um avião ou a superfície de uma esfera pode ser colorido com apenas quatro cores, de modo que não há dois países adjacentes coloridos com a mesma cor. Cada país deve consistir de uma única região ligada e os países adjacentes são aqueles que têm uma linha de limite (não apenas um único ponto) em comum. A conjectura agiu como um catalisador no ramo da matemática conhecido como topologia combinatória e está intimamente relacionada com um campo atualmente em voga da teoria dos grafos. Mais de meio século de trabalho realizado por muitos matemáticos produziu provas para casos especiais. O consenso é que a conjectura é correta, mas improvável de ser provado em geral. Este parece destinado a se manter por algum tempo tanto como o problema mais simples quanto fascinante e não resolvido problema da matemática.

Como pudemos observar na citação do texto de Harary(1969), nessa data o problema da conjectura das quatro cores ainda era um problema sem solução. De acordo com a abordagem de Sousa (2001), o problema das Quatro cores trata da determinação do número mínimo de cores necessárias para colorir um mapa, de países reais ou imaginários, de forma a que países com fronteira comum tenham cores diferentes. Em 1852, Francis Guthrie conjecturou que quatro era esse número mínimo. Mas, não obstante a aparente simplicidade, só ao cabo de mais de cem anos, em 1976, se conseguiu provar que realmente a conjectura estava certa, obtendo-se o chamado teorema das quatro cores. Muitos dos melhores matemáticos do século XX trabalharam seriamente neste problema e este estudo teve um papel muito importante no desenvolvimento da Teoria dos Grafos, onde muitas questões foram postas e vários problemas relacionados foram resolvidos.

A teoria dos grafos torna-se cada vez mais compatível com análise de redes de um modo geral. Bertsekas (1998) afirma que, problemas de fluxo de rede são uma das mais importantes e mais frequentes classes de problemas de otimização encontrados. Eles surgem naturalmente na análise e projeto de sistemas de grande porte, tais como comunicação, transporte e redes de produção. Eles também podem ser utilizados para modelar classes importantes de problemas combinatórios, tais como atribuição, o caminho mais curto, e os problemas do caixeiro viajante.

Pode-se afirmar que de um modo bem superficial, problemas de fluxo de rede são pontos de oferta e demanda, formando um conjunto com várias vias que ligam os pontos e são usados para transferir o fornecimento à demanda. Estas rotas podem conter pontos de transbordo intermediários. Muitas vezes podem ser modelados: os pontos de abastecimento, demanda e transbordo de um grafo e as rotas pelos caminhos do grafo. Além disso, pode haver vários "tipos" de oferta / demanda partilhando as rotas. Pode também haver algumas restrições sobre as características das rotas, tais como a sua capacidade de transporte, e alguns custos associados à utilização de linhas específicas. Tais situações são naturalmente modelados como problemas de otimização da rede em que, a grosso modo, tenta-se selecionar rotas que minimizam o custo de transferência da oferta para a demanda.

Os grafos são elementos muito úteis na resolução de problemas de roteamento e dos que envolvem análise combinatória. Muitos dos problemas na área de informática, matemática e engenharia são resolvidos pela modelagem de grafos. Goldbarg e Luna (2005) afirmam que o conceito de grafo é extremamente simples e até mesmo intuitivo. Podemos considerar que um grafo nada mais é que uma representação gráfica de interdependência entre elementos que são representados por nós. Elementos que atendem à relação imaginada são simbolicamente unidos através de um traço denominado aresta.

De acordo com Goldbarg e Luna (2005) “um grafo é uma estrutura de abstração que representa um conjunto de elementos denominados nós e suas relações de interdependência ou arestas.”

De acordo com Diestel (2005), um grafo é um par  $G = (V, A)$  de tais conjuntos que  $A \subseteq [V]^2$ . Assim, os elementos de  $A$  são 2-elementos subconjuntos de  $V$ . Para evitar ambiguidades de notação, assume-se sempre, de forma implícita, que  $V \cap A = \emptyset$ . Os elementos de  $V$  são os vértices ou nós do grafo  $G$ . Os elementos de  $A$  são as arestas ou linhas. A maneira usual para retratar um grafo é de um ponto para cada vértice, e unindo dois destes pontos por uma linha. Estão apresentados a seguir os elementos básicos da teoria dos grafos, bem como uma breve explicação:

— Vértice é a unidade fundamental do qual os grafos são formados.

- Aresta é a curva que une um vértice a outro. É representada como um par não ordenado do tipo:  $a = (u, v)$ , onde  $u$  e  $v$  são os vértices que são as extremidades da aresta.
- Caminho é um percurso percorrido através de vértices adjacentes.
- Grafo Direcionado é um grafo onde as arestas estão direcionadas num único sentido, ou seja, nestes casos o fluxo pode ser considerado apenas no sentido das arestas.
- Grafo Ponderado é um grafo que possui pesos associados às suas arestas.

#### 4.6 Representação numérica dos grafos

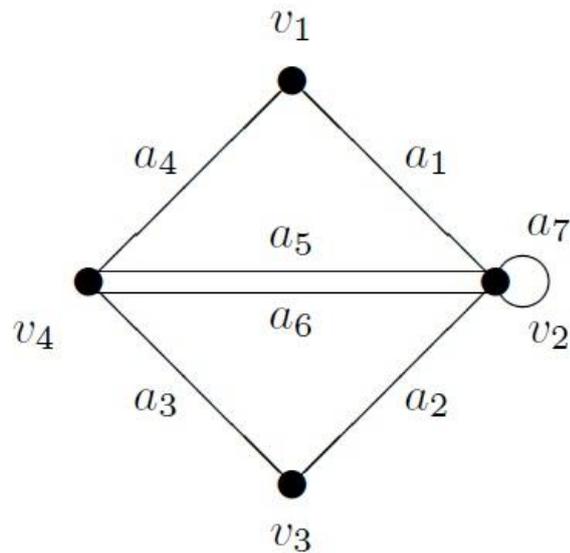
Sabe-se que, de um modo geral, a forma como as equações e os modelos matemáticos, quando são definidos e resolvidos manualmente, são em muitos casos diferentemente tratados quando implementados ou resolvidos computacionalmente. Para os computadores muitas das abstrações da matemática inexistem, pois eles trabalham com uma capacidade finita de processamento. Devido a estas diferenças básicas e restrição da capacidade de processamento, os modelos representados computacionalmente são simulados por meio de modelos numéricos. De acordo com Picado (2010), a matemática discreta é muito usada quando se estuda as relações entre conjuntos finitos e quando se trata de processos (algoritmos) envolvendo um número finito de passos. É um ramo muito importante da matemática, pois nos computadores a informação é tratada e processada de forma discreta.

Os grafos são representados e manipulados numericamente de um modo mais eficiente quando representados como matrizes. Conforme Picado (2010) existem basicamente duas formas de representar um grafo, como matriz:

##### — **Matriz de adjacência**

A matriz adjacência de um grafo  $G$  é do tipo,  $A = [a_{ij}]$ , de ordem  $n \times n$ , onde  $a_{ij}$  é o número de arestas que ligam o vértice  $v_i$  ao  $v_j$ . A matriz adjacência do grafo da figura 4.4 está apresentada a seguir:

Figura 4.4 Grafo ponderado não direcionado



Fonte: Estruturas discretas: Textos de apoio, Jorge Picado - 2010

Tabela 4.1 Matriz adjacência

MATRIZ ADJACÊNCIA				
Vértices	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$
$v_1$	0	1	0	1
$v_2$	1	1	1	2
$v_3$	0	1	0	1
$v_4$	1	2	1	0

Fonte: O autor

Portanto a matriz adjacência fica da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

#### — Matriz incidência

A matriz incidência de  $G$  (mesmo grafo do exemplo anterior) é uma matriz  $B = [b_{ij}]$ . A ordem da matriz é  $n \times m$ , onde  $b_{ij} = 1$ , caso  $a_j$  seja incidente em  $v_i$ , e  $b_{ij} = 0$ , caso contrário. Segue exemplo abaixo:

Tabela 4.2 Matriz incidência

MATRIZ INCIDÊNCIA							
Vértices/ Arestas	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
$v_1$	1	0	0	1	0	0	0
$v_2$	1	1	0	0	1	1	1
$v_3$	0	1	1	0	0	0	0
$v_4$	0	0	1	1	1	1	0

Fonte: O autor

Deste modo a matriz incidência fica na forma:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Essas matrizes são denominadas matrizes esparsas e têm um papel importante na simulação de problemas de rede ou malhas. Percebe-se que toda matriz adjacência é simétrica e que se não houver laço, todos os elementos da diagonal principal são nulos.

#### 4.7 Algoritmos de busca em grafos

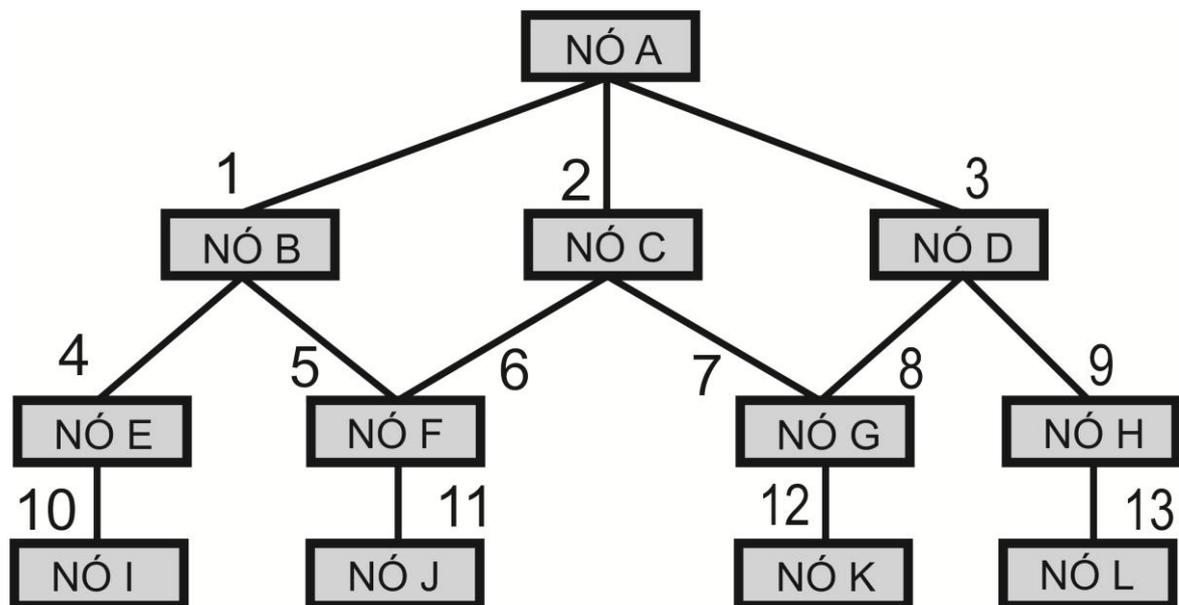
Os algoritmos de busca nos grafos levam em consideração basicamente o percurso em árvores. No caso de representação de redes hidráulicas o percurso em árvores é uma regra. O percurso em árvore leva em consideração a análise sistemática dos vértices de um grafo, sendo este dirigido ou não. Existem diversos percursos possíveis o que torna a maioria dos algoritmos compatíveis com resolução de problemas de combinatória. A busca em árvore pode ser basicamente de dois tipos: busca em largura (Breadth-First Search ou BFS) e busca em profundidade (Depth-First Search ou DFS).

##### — Busca em largura ou extensão

A aplicabilidade deste tipo de busca em árvores ocorre devido ao fato das árvores não possuírem ciclos. Um percurso dito em extensão visita cada nó iniciando do menor nível, movendo-se para os níveis mais elevados, evoluindo nível após nível, visitando os nós da esquerda para a direita. A melhor forma de

implementar este tipo de algoritmo de busca é quando usamos uma estrutura de fila. Deste modo os nós de um mesmo nível são dispostos de modo a formar uma fila. Se eles possuírem filhos, estes ocuparão o fim da fila e assim sucessivamente, até que todos os níveis tenham sido atingidos e todos os vértices tenham sido percorridos. Na figura 4.5 pode-se entender melhor este tipo de busca.

Figura 4.5 Exemplo de busca em largura

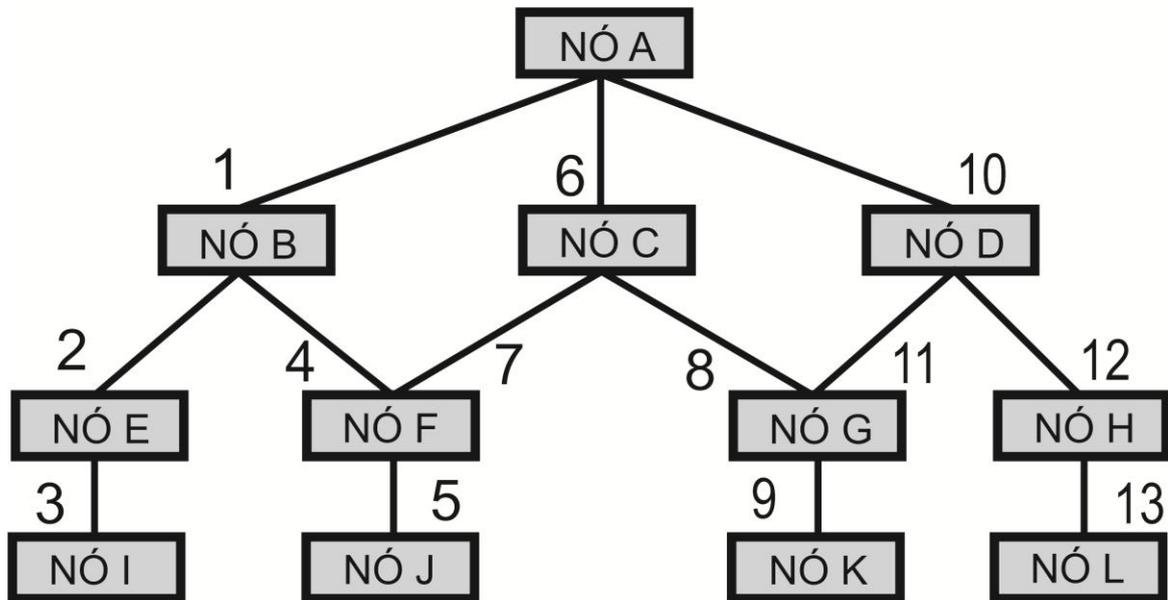


Fonte: O autor

#### — Busca em profundidade

Os algoritmos de busca em profundidade diferentemente da busca em largura não visitam todos os vértices vizinhos de um vértice inicial. A busca em profundidade visita um vértice filho, em seguida o filho do filho, penetrando em todos os níveis, até que se atinja um vértice onde não haverá mais vértices filho. Atingido este nível a busca retrocede um nível e verifica se existe um vértice ainda não visitado, e segue a busca da mesma forma até que todos os vértices tenham sido visitados.

Figura 4.6 Exemplo de busca em profundidade



Fonte: O autor

Os principais problemas envolvendo grafos são: coloração de grafos, conjuntos de grafos, problemas de roteamento, fluxos de rede e problemas de isomorfismo. Classifica-se o problema abordado neste texto como pertencente à classe dos problemas de roteamento. A princípio pode-se pensar se tratar de problemas de fluxos de rede, no entanto no decorrer do trabalho tornar-se-á mais clara a classificação adotada.

Problemas de roteamento classificam-se basicamente nos seguintes subproblemas:

- Árvore de extensão mínima
- **Problema do caminho mínimo**
- Problema da inspeção de rotas
- Problema do caixeiro viajante

De acordo com Bertsekas (1998) o problema do caminho mais curto (ou caminho mínimo) é um problema clássico e importante de combinatória que surge em muitos contextos. Considere um grafo direcionado  $(N, E)$  com vértices, numerados de  $1, \dots, N$ . Cada aresta  $(i, j) \in E$  tem um custo ou "comprimento"  $a_{ij}$  associado a ela. O comprimento de um caminho para frente  $(i_1, i_2, \dots, i_k)$  é o comprimento de seus arcos.

$$\sum_{n=1}^{k-1} a_{in \ in+1} \quad (4.13)$$

Este caminho é dito o menor se tiver comprimento mínimo sobre todos os caminhos à frente, com a mesma origem e nós de destino. O comprimento mais curto de um caminho é também chamado de distância mais curta. A gama de aplicações do problema do caminho mais curto é muito ampla.

O problema do caminho mínimo é o que mais se assemelha ao problema abordado neste trabalho. Os principais algoritmos especializados em resolver este tipo de problema são:

- **Algoritmo de Dijkstra** – Este algoritmo resolve o problema do caminho mais curto entre dois vértices levando em consideração que os pesos associados às arestas são maiores ou iguais a zero.
- Algoritmo de Bellman-Ford – Este algoritmo resolve o mesmo problema, no entanto os pesos associados às arestas podem ser negativos.
- Algoritmo A\* - Este algoritmo também realiza busca de um vértice inicial a um vértice final, ele é produto de uma combinação da aproximação heurística com o algoritmo de Dijkstra.
- Algoritmo de Floyd-Warshall – Este algoritmo é capaz de calcular o caminho mais curto entre todos os pares de vértices de um grafo direcionado ponderado.
- Algoritmo de Johnson – Este algoritmo também encontra um caminho mínimo entre dois vértices. Ele admite bordas negativas, no entanto não admite pesos negativos.
- Algoritmo de Kruskal – Este algoritmo busca uma árvore geradora mínima de um grafo conexo com pesos.

O algoritmo de Dijkstra será demonstrado mais a fundo, tendo em vista a sua utilização nas simulações realizadas neste trabalho. O algoritmo de Dijkstra foi desenvolvido por um cientista da computação holandês chamado Edsger Dijkstra, no ano de 1956 e publicado no ano de 1959. Conforme mostrado anteriormente este algoritmo se destina a resolver problemas de caminho mínimo de grafos dirigidos e não dirigidos com arestas com pesos não negativos. O tempo computacional para a

resolução dos problemas é da ordem  $([m+n]\log n)$  onde  $m$  é o número de arestas e  $n$  é o número de vértices.

O algoritmo de Dijkstra é semelhante à busca em largura, entretanto ele é classificado como um algoritmo guloso, ou seja, decide pela solução ótima do momento. Esta estratégia é muito interessante, pois se " $C$ " for um caminho menor entre dois vértices  $v$  e  $w$ , todo e qualquer sub-caminho de  $C$  é o menor caminho entre dois vértices pertencentes ao caminho  $C$ , deste modo o método encontra o melhor caminho total atualizando os melhores caminhos parciais.

Segundo PICADO (2010) a formulação geral do algoritmo de Dijkstra diz o seguinte:

Seja  $V(G) = \{v_1, \dots, v_n\}$ . Denote  $c(v_i, v_j)$  como o comprimento da aresta entre os vértices  $v_i$  e  $v_j$ . O algoritmo se inicia etiquetando  $v_1$  com um zero e os demais vértices com  $\infty$ . Ilustre este passo inicial com a seguinte notação:  $L_0(v_1) = 0$  e  $L_0(v) = \infty$  para estes rótulos. Estes são os caminhos mais curtos de  $v_1$  a um vértice que ainda não foi visitado a não ser o próprio  $v_1$ , ou seja,  $\infty$  significa dizer que não existe nenhum caminho sob estas condições.

O algoritmo prossegue gerando uma família específica de vértices. Seja  $S_k$  tal família após  $k$  iterações. Inicia-se com  $S_0 = \emptyset$ . O conjunto  $S_k$  forma-se a partir de  $S_{k-1}$  acrescentando-lhe o vértice  $w$  com o menor rótulo entre os que não estão em  $S_{k-1}$ . Uma vez que este vértice tenha sido acrescentado a  $S_{k-1}$ , atualizam-se os rótulos que não pertencem a  $S_k$  de modo que o rótulo  $L_k(v)$  (rótulo do vértice  $v$  no  $k$  –ésimo passo) seja o comprimento do caminho mais curto de  $v_1$  a  $v$ , contendo apenas vértices de  $S_k$ . Note-se que,

$$L_k(v) = \min\{L_{k-1}(v), L_{k-1}(w) + c(w, v)\} \quad (4.14)$$

De um modo formal o algoritmo de Dijkstra determina o caminho mais curto entre dois vértices quaisquer, de um grafo com arestas, com peso positivo da seguinte forma:

Passo 1: Faça

$$c(v_i, v_j) = \begin{cases} \text{Comprimento da aresta } v_i v_j & \text{caso ela exista} \\ \infty & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Passo 2: Faça  $L(v_1) := 0, L(v_2) := \infty, S := \emptyset$ .

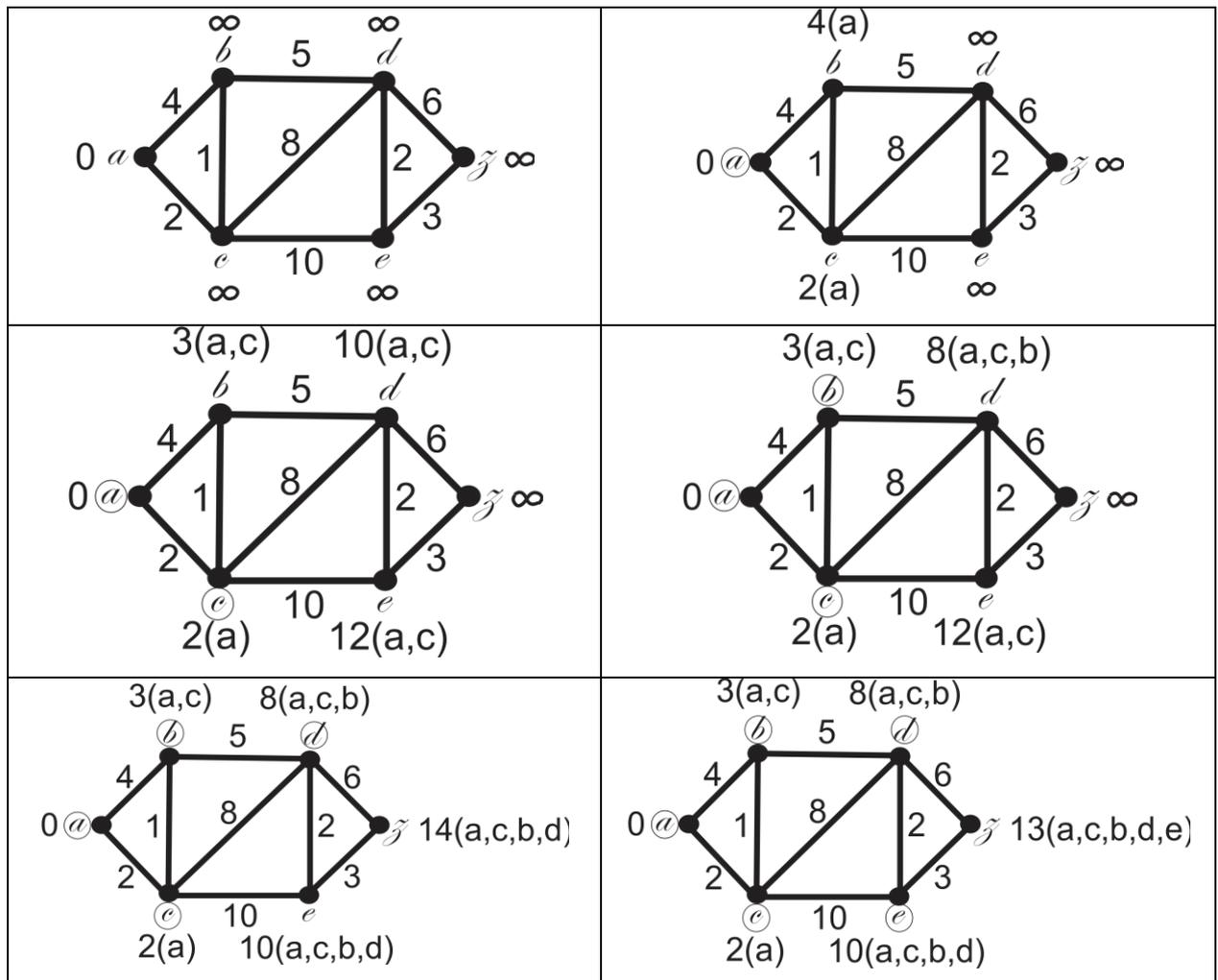
Passo 3: Enquanto  $v_n \notin S$  faça

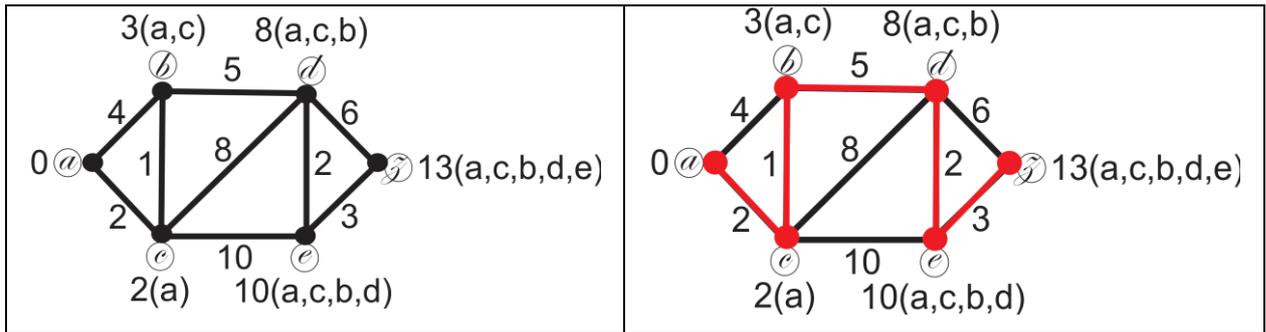
- (a)  $w :=$  vértice em  $V(G) \setminus S$  com rótulo  $L(w)$  mínimo;
- (b)  $S := S \cup \{w\}$ ;
- (c) Para todos os vértices em  $V(G) \setminus S$ , se  $L(w) + c(w, v) < L(v)$  faça  $L(v) := L(w) + c(w, v)$ .

Passo 4: O comprimento mais curto de  $v_1$  a  $v_n$  é então  $L(v_n)$ .

A figura 4.7 exemplifica de forma clara a aplicação do algoritmo num grafo exemplo.

Figura 4.7 Aplicação do algoritmo de Dijkstra





Fonte: Estruturas Discretas: Textos de apoio, Jorge Picado - 2010

#### 4.8 Tipologia das redes

As redes são infraestruturas interligadas de tubulações com o objetivo final de conduzir um fluido para pontos de consumo, visando a atender simultaneamente objetivos técnicos e econômicos. De acordo com Gomes (2002, apud, Rosal, 2007), as redes são constituídas de uma série de elementos básicos.

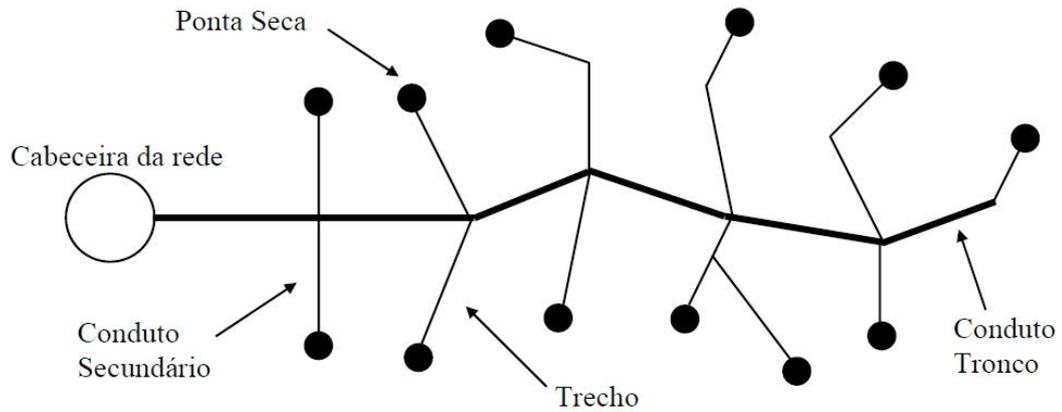
- Trecho: percurso da rede onde a vazão permanece constante;
- Nó / nó de derivação: ponto onde ocorre a união entre dois ou mais trechos;
- Ramal: conjunto de trechos ligados em série entre si;
- Artérias: percursos principais da rede, constituídos de ramais ligados em série;
- Cabeceira da rede (Alimentação): origem da rede de distribuição, local onde normalmente se localizam o reservatório ou o sistema de bombeamento direto.
- Traçado da rede: configuração da distribuição das tubulações.

De acordo com Porto (1999), os condutos que constituem as redes são classificados basicamente de dois tipos: condutos principais (condutos tronco) e condutos secundários. Normalmente os condutos principais têm um diâmetro maior, tendo em vista que são responsáveis por abastecer os condutos secundários, que por sua vez abastecem os pontos de consumo.

Segundo Lencastre (1983), as redes são classificadas de acordo com a disposição dos condutos principais e com o sentido de escoamento nos condutos secundários como ramificadas ou malhadas.

A figura 4.8 mostra um exemplo de rede ramificada. Neste tipo de rede o sentido das vazões, em qualquer trecho, é conhecido.

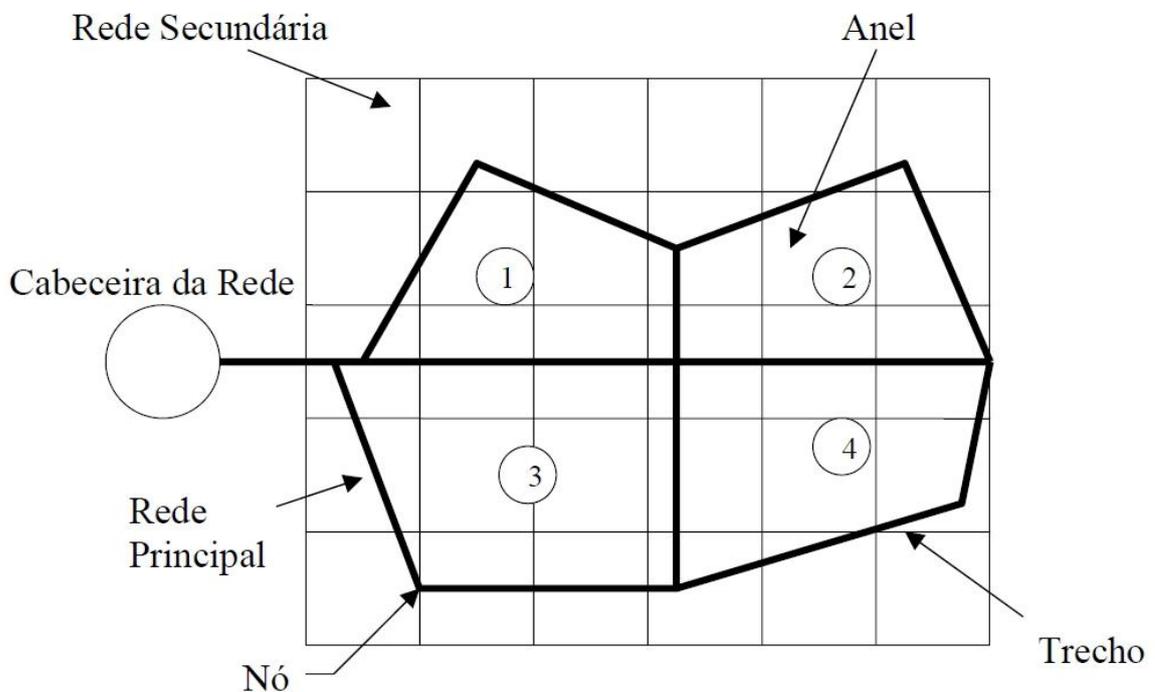
**Figura 4.8 Exemplo de rede do tipo ramificada**



Fonte: ROSAL, M. C. F.; 2007

As redes malhadas são formadas por trechos em forma de anéis ou malhas. Conforme pode-se observar na figura 4.9.

**Figura 4.9 Exemplo de rede do tipo malhada**



Fonte: ROSAL, M. C. F.; 2007

Cada tipo de configuração possui suas vantagens e desvantagens. As redes ramificadas normalmente são mais fáceis de dimensionar e apresentam custo de implantação mais baixo. Já as redes malhadas são muito utilizadas por oferecer uma complexidade maior de caminhos, fazendo com que os problemas de abastecimento sejam minimizados em caso de manutenção.

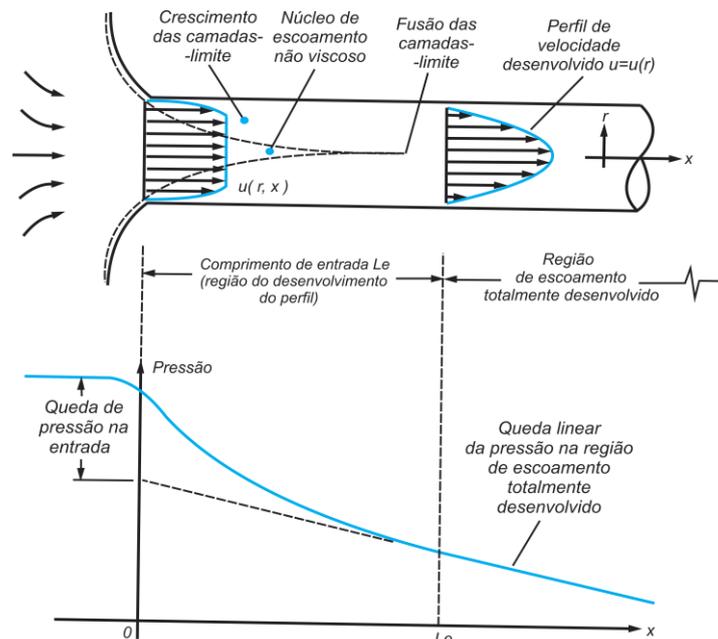
## **5 Metodologia**

Este capítulo explica as simulações efetuadas bem como os demais tópicos acerca do funcionamento geral do algoritmo proposto. A metodologia empregada para a resolução do problema envolve basicamente sete passos conforme mostrado nos objetivos específicos.

### **5.1 Planilha de cálculos**

A planilha de cálculos visa sistematizar os cálculos das perdas de carga de cada trecho da rede. Pelo fato de tratar-se de redes hidráulicas formadas por tubulações fechadas, o escoamento do fluido é configurado como um escoamento em dutos fechados. De acordo com Frank M. White (2011), “Um escoamento interno é restringido pelas paredes limítrofes, e os efeitos viscosos irão crescer, encontrar-se e permear todo o escoamento”. A figura 5.1 mostra os perfis de velocidade e a variação da pressão na entrada do escoamento em um duto fechado.

**Figura 5.1 Perfis de velocidade e variação da pressão num duto fechado totalmente cheio**



Fonte: WHITE, F. M.; Mecânica dos fluidos, 2011

Neste texto os efeitos do desenvolvimento dos perfis de velocidade foram desconsiderados pelo fato dos tubos do estudo de caso ser longo. Deste modo o escoamento do fluido sofre influencia da rugosidade<sup>2</sup> das paredes da tubulação. Esta rugosidade está relacionada ao fator de atrito da tubulação, que por sua vez está intimamente relacionado à perda de carga na tubulação. Outra característica importante no estudo do escoamento de fluidos é a caracterização do regime de escoamento, ou seja, se o escoamento é laminar ou turbulento. Para caracterizar o regime de escoamento é necessário o cálculo do número de Reynolds, que é um numero adimensional calculado por meio da expressão:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (5.1)$$

Onde:

$\rho =$  Massa específica do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v =$  Velocidade média do fluido ( $\text{m}/\text{s}$ )

<sup>2</sup> É importante mencionar que a energia dissipada para mover um fluido de um ponto A para um ponto B (perda de carga) está relacionada, antes de qualquer outro fator, com a viscosidade do fluido a ser bombeado. Pelo fato do fluido considerado neste texto ser água (baixa viscosidade) o impacto dos efeitos da viscosidade são minizados.

$D = \text{Diâmetro do tubo (m)}$

$\mu = \text{Viscosidade dinâmica do fluido (kg/m * s)}$

A classificação do regime de escoamento de acordo com o número de Reynolds está apresentada na tabela 5.1.

**Tabela 5.1 Caracterização do regime de escoamento**

<b>CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO</b>	
$0 < Re < 1$	Movimento laminar altamente viscoso (creeping flow)
$1 < Re < 2000$	Regime laminar
$2000 < Re < 4000$	Região de transição
$Re > 4000$	Regime turbulento

**Fonte: Adaptado de WHITE, F. M.; Mecânica dos fluidos, 2011**

Vale salientar que essas faixas podem variar de acordo com a geometria do escoamento, rugosidade superficial e nível de flutuações na corrente de entrada.

### **5.1.1 Cálculo das perdas de carga**

A perda de carga representa a perda de energia para bombear um fluido de um lugar para outro, portanto essa perda energética tem influência direta sobre a pressão de saída num escoamento em dutos fechados, esta influência se dá devido às forças de resistência impostas ao escoamento do fluido ao longo da tubulação e/ou devido a resistência do fluido a tensões cisalhantes (viscosidade), conforme analisado na figura 5.1. Existem dois tipos de perda de carga: a distribuída e a localizada. A perda de carga distribuída é a que se dá ao longo da tubulação e ocorre basicamente devido ao atrito entre as paredes da tubulação e o fluido que por ela escoar. Já a perda de carga localizada ocorre quando o fluido sofre uma variação na direção de escoamento ou do seu diâmetro. Este tipo de perda de carga é causado por elementos de ligação como Tê's, curvas, reduções e etc.

### 5.1.1.1 Perda de carga distribuída

Conforme Fox (2006), as perdas de carga distribuídas são causadas pelo efeito do atrito num escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante. Deste modo a perda de carga distribuída pode ser expressa como sendo a perda de pressão para escoamentos completamente desenvolvidos num tubo de área constante. A equação utilizada na planilha para o cálculo das perdas de carga é a de Darcy-Weisbach <sup>3</sup> esta equação é uma das mais usadas para dimensionamento de redes. A equação é mostrada a seguir:

$$h_p = f \frac{L*V^2}{d*2*g} \quad (5.2)$$

Onde:

$f$  = fator de atrito de Darcy (Adimensional)

$L$  = Comprimento da tubulação (m)

$V$  = Velocidade média do fluido (m/s)

$d$  = Diâmetro da tubulação (m)

$g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

Existem várias fórmulas matemáticas capazes de fornecer boas aproximações para o cálculo do fator de atrito. A equação utilizada tanto, na planilha quanto no EPANET 2.0, é a de Swamee-Jain, para resolver a equação de Colebrook-White, segundo com Rossman (2000, apud BHAVE, 1991) ela se aplica para os casos onde o  $R_e > 4000$ .

---

<sup>3</sup> Esta equação, como muitas outras na história da ciência, tem uma história longa. Ela tem esse nome por causa de dois engenheiros hidráulicos do século 19 (Julius Weisbach (1806-1871) e Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858)) Ela foi concebida por Weisbach, em 1845, como a conhecemos hoje, no entanto ela não foi capaz de fornecer resultados satisfatórios para variações de  $f$  com a rugosidade relativa e com a velocidade. Nesta época a equação empírica de Prony era amplamente utilizada e fornecia resultados mais confiáveis. Em 1857 Darcy na época aluno de Prony propôs por meio de sua equação que os coeficientes de atrito fossem escalonados por diâmetro. Por meio desta nova forma de cálculo de  $f$  os valores encontrados pela equação de Weisbach passaram a ser mais confiáveis. No entanto somente quase cem anos depois (1939) foi estabelecida definitivamente uma expressão mais segura para o cálculo do fator de atrito “ $f$ ”, essa expressão é conhecida como equação de Colebrook-White.

$$f = \frac{0,25}{\left[ \text{Ln} \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (5.3)$$

Onde:

$\text{Ln}$  = Logaritmo neperiano (na base e)

$\varepsilon$  = Rugosidade (m)

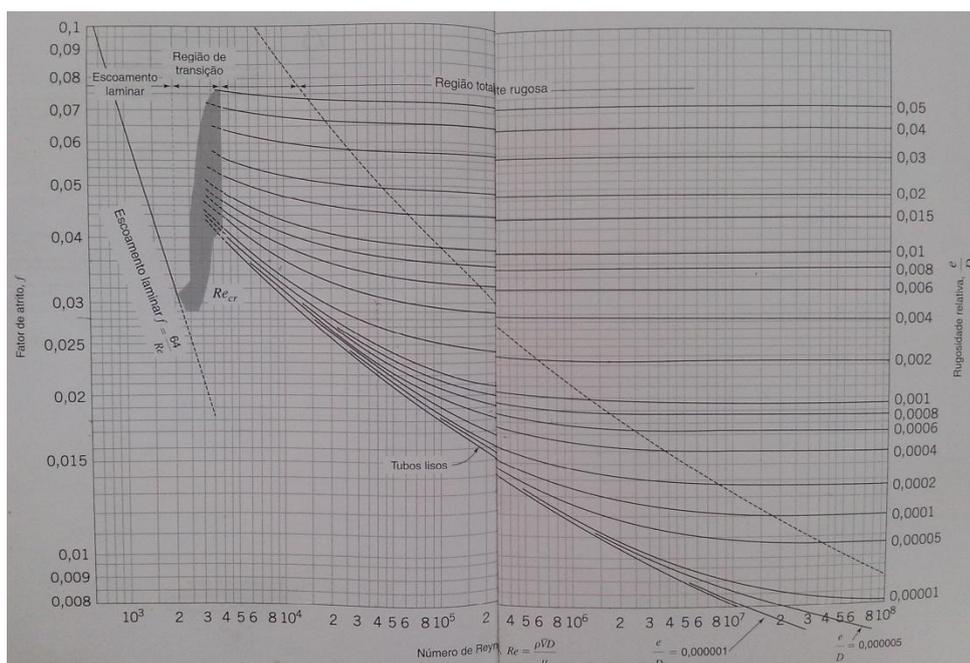
$d$  = Diâmetro da tubulação (m)

$Re$  = Número de Reynolds

Esta equação introduz um erro de cerca de 0,386% no valor do fator de atrito. No entanto este erro é aceitável tendo em vista que nas considerações do estudo de caso pôde-se observar que os efeitos da propagação do erro são minimizados. A medida do fator de atrito considerado se mantém quase constante devido a poucas alterações no Reynolds devido à maior parte da rede ser composta por tubulações de diâmetro constante, bem como com uma vazão constante.

O fator de atrito de Darcy também pode ser consultado no diagrama de Moody, mostrado na figura 5.2:

Figura 5.2 Diagrama de Moody



Para obter o valor do fator de atrito por meio deste diagrama é necessária a entrada da rugosidade relativa, bem como o valor de Reynolds. No entanto este diagrama impossibilita o cálculo sistemático da perda de carga, isto devido ao fato de precisar-se consultar o valor deste fator para cada trecho considerado.

### **5.1.1.2 Perda de carga localizada**

Segundo Fox (2006), as perdas de carga localizadas são relativamente menores, isto se o sistema incluir trechos longos de tubos com seção constante e poucos elementos de ligação. As perdas de carga localizadas são calculadas basicamente de duas formas pela fórmula:

$$h_{pl} = f \frac{L_e}{d} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (5.4)$$

Onde  $L_e$  é o comprimento equivalente, ou seja, esse termo representa o comprimento de tubo reto necessário para causar o mesmo efeito da mudança de direção do fluido. Ou pela fórmula.

$$h_{pl} = K \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (5.5)$$

Onde o coeficiente K é tabelado por meio de dados experimentais de acordo com o elemento de ligação. Segue abaixo na tabela 5.2 os valores para os principais acessórios:

Tabela 5.2 Valores dos coeficientes de perda de carga localizada (K)

Singularidade	Coeficiente da Perda de Carga
Válvula de globo, abertura completa	10,0
Válvula de ângulo, abertura completa	5,0
Válvula de retenção, abertura completa	2,5
Válvula de cunha, abertura completa	0,2
Curva a 90° (raio pequeno)	0,9
Curva a 90° (raio médio)	0,8
Curva a 90° (raio grande)	0,6
Curva a 45°	0,4
Curva de Retorno	2,2
Tê Standard – escoamento na linha	0,6
Tê Standard – escoamento linha - ramal	1,8
Entrada em aresta viva (Reservatório - tubulação)	0,5
Entrada em aresta viva (Tubulação – reservatório)	1,0

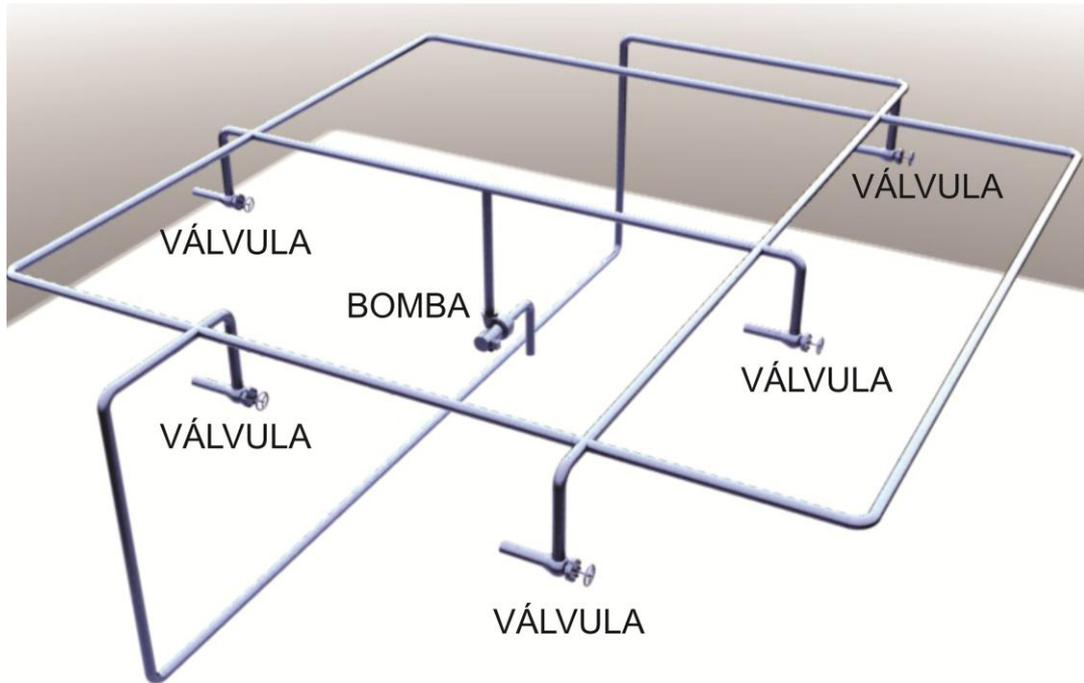
Fonte: Adaptado de ROSSMAN, Epanet 2 Users Manual, 2000

Para o cálculo das perdas de carga localizadas a equação utilizada na planilha foi a 5.5.

## 5.2 Convertendo uma rede em grafo

De posse da planilha com os trechos definidos e as perdas de carga calculadas, é necessário que seja definido o grafo para que o algoritmo possa fazer a busca pelo caminho hidraulicamente mais desfavorável. O que melhor define o problema em questão é um grafo ponderado não direcionado. A planilha de perdas de carga é responsável por fornecer todos os dados necessários para a elaboração do grafo, ou seja, os trechos são as arestas. As extremidades das arestas são os vértices, e os valores das perdas de carga para cada trecho é o respectivo peso associado à aresta. Tome-se como exemplo a tubulação da figura abaixo. O sistema é composto de uma bomba, cinco válvulas e um conjunto de tubos. O grafo correspondente a esta rede pode ser definido da seguinte forma.

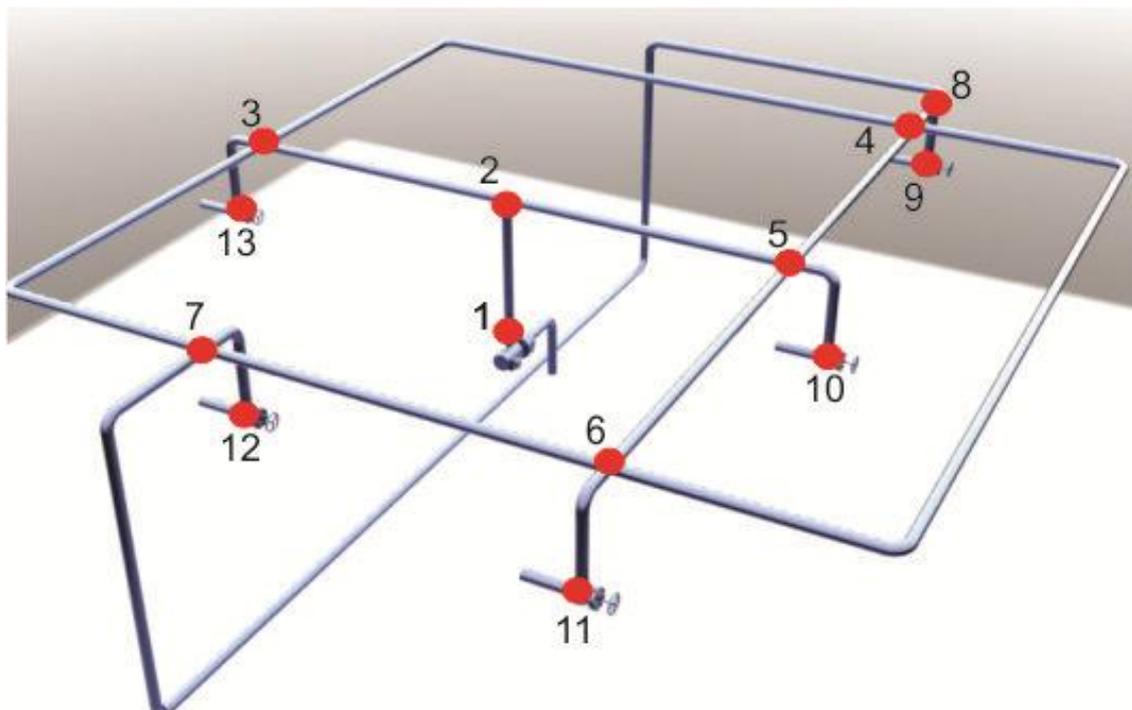
**Figura 5.3 Exemplo de rede hidráulica**



Fonte: O autor

Primeiramente é necessário que se definam os nós do grafo, desta forma define-se automaticamente as arestas. Segue na figura 5.4 os pontos selecionados.

**Figura 5.4 Exemplo de rede hidráulica com pontos marcados**



Fonte: O autor

Com os pontos marcados no isométrico as arestas são definidas de acordo com o tabela abaixo:

**Tabela 5.3 Vetores e pesos**

<b>Arestas</b>	<b>Vetor das origens</b>	<b>Vetor dos destinos</b>	<b>Perda de carga(mca)</b>
<b>1-2</b>	1	2	1,41
<b>2-3</b>	2	3	1,68
<b>2-5</b>	2	5	1,59
<b>3-4</b>	3	4	3,03
<b>4-5</b>	4	5	1,59
<b>4-8</b>	4	8	0,79
<b>5-6</b>	5	6	1,59
<b>6-7</b>	6	7	1,77
<b>8-9</b>	8	9	6,97
<b>5-10</b>	5	10	7,68
<b>6-11</b>	6	11	7,86
<b>7-12</b>	7	12	7,68
<b>3-13</b>	3	13	7,68

**Fonte: O autor**

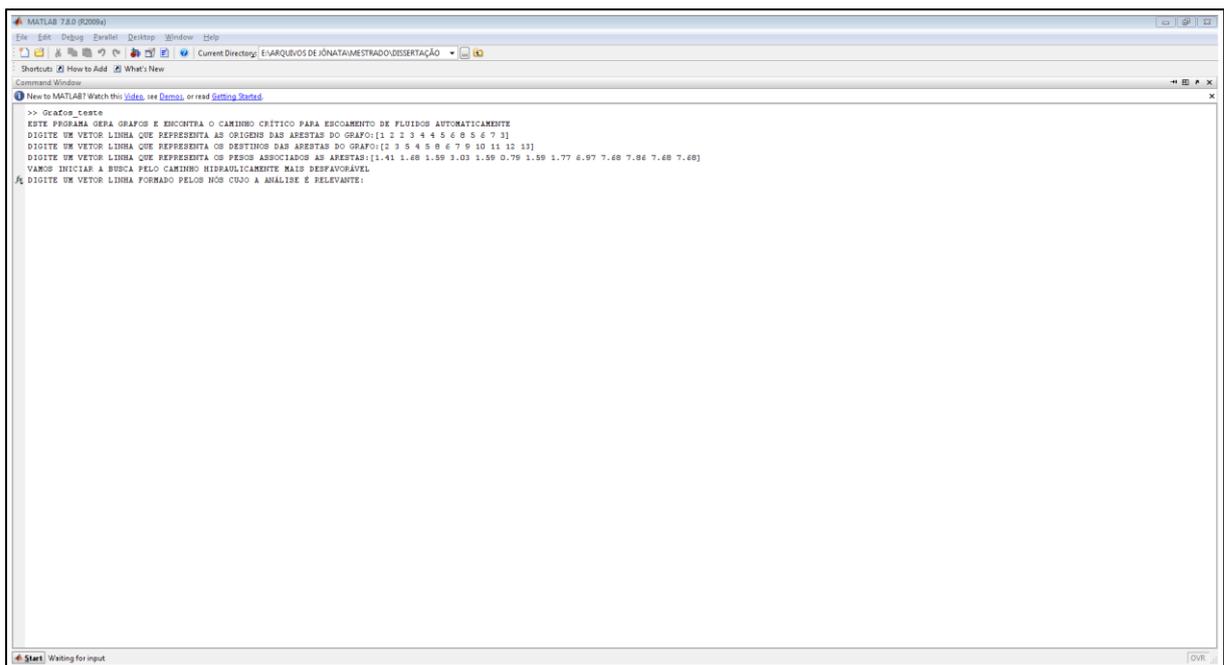
Como se pode notar, os vetores origens e destinos derivam das arestas, já a perda de carga depende do comprimento e diâmetro da tubulação, da vazão, do material, e do elemento de ligação presente no trecho considerado. Neste exemplo o valor das perdas de carga foi atribuído aleatoriamente e constam apenas como exemplo para que o modelo fique completo.

### **5.2.1 Gerando o grafo no MATLAB®**

O MATLAB® é um software amplamente utilizado no meio da engenharia. A principal vantagem de se utilizar uma ferramenta como esta é a simplicidade da linguagem e a versatilidade da aplicação. A versão usada neste trabalho foi a para estudante do MATLAB R2009a. Uma das vantagens deste software é que ele possui uma biblioteca de funções pré-estabelecidas que podem ser inseridas como sub-rotina de um novo programa escrito pelo o usuário. Neste caso o problema foi resolvido por meio do algoritmo de dijkstra. Foi desenvolvido um programa com 40 linhas de comando visando melhorar a interação com o usuário. Isso fez com que

depois da execução do programa fossem solicitados apenas os vetores que representam os nós de origem, destino, pesos (perdas de carga) e nós para análise. Como resposta o programa gera automaticamente o grafo, analisa todos os caminhos possíveis, mostra a perda de carga máxima e pinta no grafo o caminho hidraulicamente mais desfavorável. A figura 5.5 mostra a interface do programa desenvolvido.

**Figura 5.5 Interface do programa**



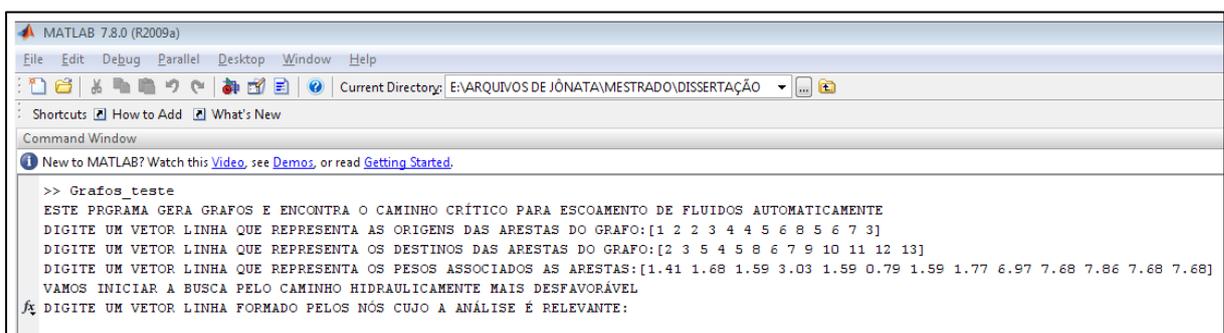
```

MATLAB 7.8.0 (R2009a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: E:\ARQUIVOS DE JÔNATA\MESTRADO\DISSERTAÇÃO
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> Grafos_teste
ESTE PROGRAMA GERA GRAFOS E ENCONTRA O CAMINHO CRÍTICO PARA ESCOAMENTO DE FLUIDOS AUTOMATICAMENTE
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA AS ORIGENS DAS ARESTAS DO GRAFO:[1 2 3 4 5 6 8 5 6 7 3]
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA OS DESTINOS DAS ARESTAS DO GRAFO:[2 3 5 4 5 8 6 7 9 10 11 12 13]
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA OS PESOS ASSOCIADOS AS ARESTAS:[1.41 1.68 1.59 3.03 1.59 0.79 1.59 1.77 6.97 7.68 7.86 7.68 7.68]
VAMOS INICIAR A BUSCA PELO CAMINHO HIDRAULICAMENTE MAIS DESFAVORÁVEL
DIGITE UM VETOR LINHA FORMADO PELOS NÓS CUJO A ANÁLISE É RELEVANTE:
  
```

**Fonte: O autor**

A figura 5.6 mostra em destaque a área da figura anterior onde o texto está contido.

**Figura 5.6 Interface do programa em destaque para o texto apresentado**



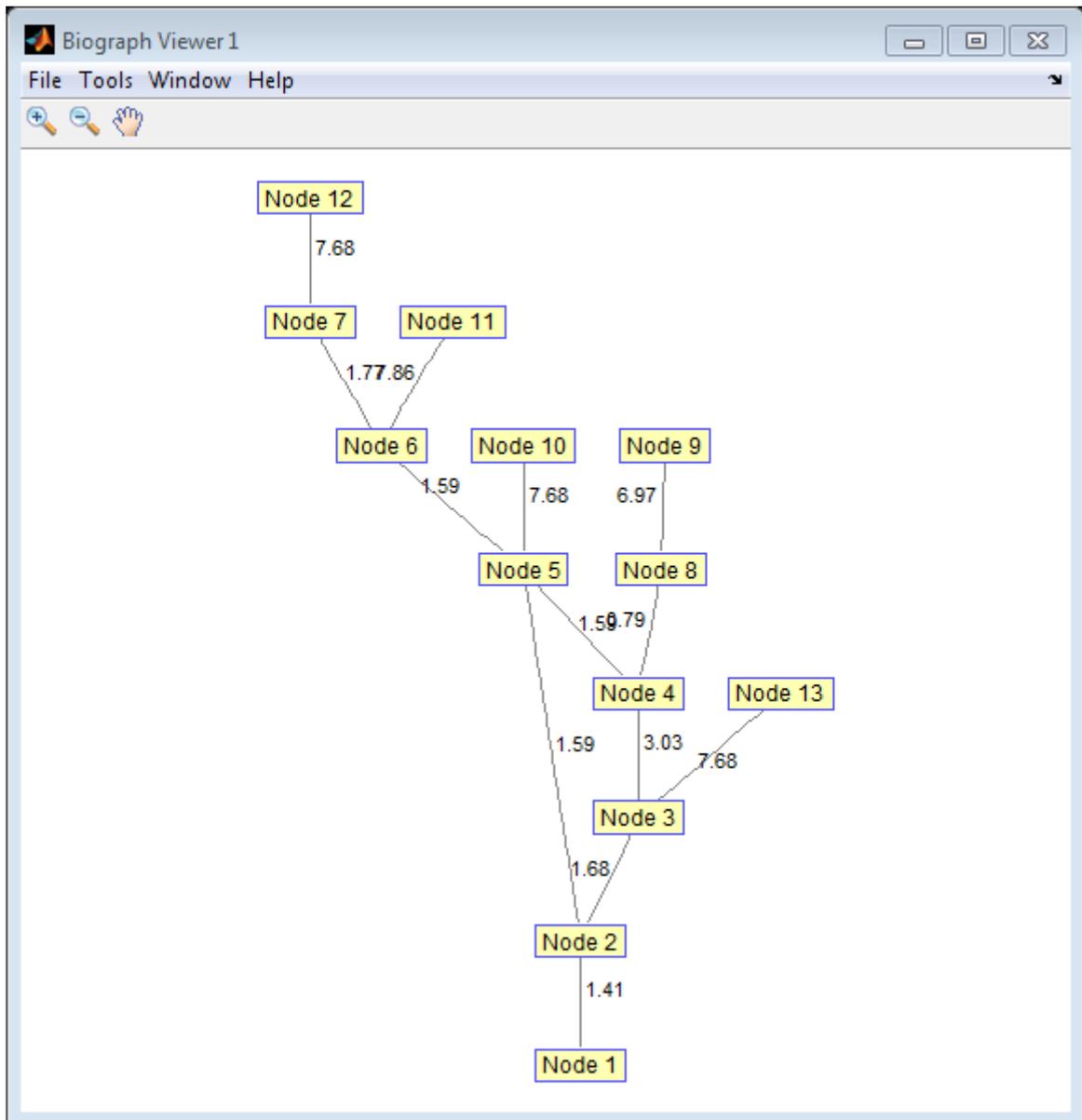
```

MATLAB 7.8.0 (R2009a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: E:\ARQUIVOS DE JÔNATA\MESTRADO\DISSERTAÇÃO
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> Grafos_teste
ESTE PROGRAMA GERA GRAFOS E ENCONTRA O CAMINHO CRÍTICO PARA ESCOAMENTO DE FLUIDOS AUTOMATICAMENTE
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA AS ORIGENS DAS ARESTAS DO GRAFO:[1 2 3 4 5 6 8 5 6 7 3]
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA OS DESTINOS DAS ARESTAS DO GRAFO:[2 3 5 4 5 8 6 7 9 10 11 12 13]
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA OS PESOS ASSOCIADOS AS ARESTAS:[1.41 1.68 1.59 3.03 1.59 0.79 1.59 1.77 6.97 7.68 7.86 7.68 7.68]
VAMOS INICIAR A BUSCA PELO CAMINHO HIDRAULICAMENTE MAIS DESFAVORÁVEL
DIGITE UM VETOR LINHA FORMADO PELOS NÓS CUJO A ANÁLISE É RELEVANTE:
  
```

**Fonte: O autor**

Com os dados fornecidos conforme mostrado na figura anterior o programa é capaz de gerar o seguinte grafo.

**Figura 5.7 Grafo correspondente ao sistema hidráulico analisado**

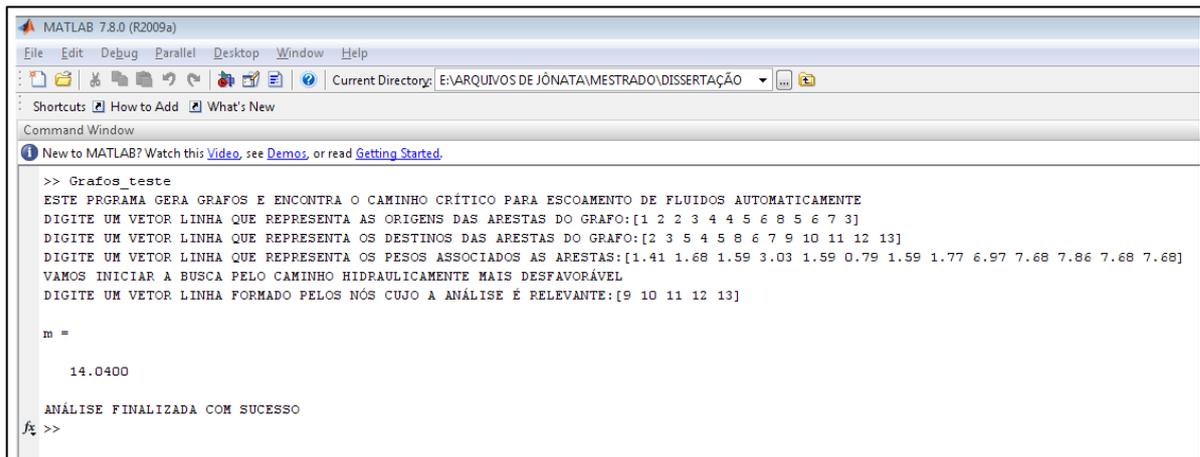


**Fonte: O autor**

É importante notar que se o separador de dígitos utilizado for vírgula o programa não entenderá a entrada como válida. Em seguida o programa solicita os nós para análise. Normalmente os nós que requerem análise são os que representam os pontos de consumo. Neste caso são os nós: [9 10 11 12 13], introduzindo este vetor

no local solicitado o programa encontrará o caminho mínimo para cada um destes e retornará o valor máximo destes e explicitará no grafo o caminho para o valor encontrado. Seguem na figura 5.8 e 5.9 as referidas telas:

**Figura 5.8 Solução da perda de carga máxima encontrada pelo programa**



```

MATLAB 7.8.0 (R2009a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: E:\ARQUIVOS DE JÓNATA\MESTRADO\DISSERTAÇÃO
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

>> Grafos_teste
ESTE PROGRAMA GERA GRAFOS E ENCONTRA O CAMINHO CRÍTICO PARA ESCOAMENTO DE FLUIDOS AUTOMATICAMENTE
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA AS ORIGENS DAS ARESTAS DO GRAFO:[1 2 2 3 4 4 5 6 8 5 6 7 3]
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA OS DESTINOS DAS ARESTAS DO GRAFO:[2 3 5 4 5 8 6 7 9 10 11 12 13]
DIGITE UM VETOR LINHA QUE REPRESENTA OS PESOS ASSOCIADOS AS ARESTAS:[1.41 1.68 1.59 3.03 1.59 0.79 1.59 1.77 6.97 7.68 7.86 7.68 7.68]
VAMOS INICIAR A BUSCA PELO CAMINHO HIDRAULICAMENTE MAIS DESFAVORÁVEL
DIGITE UM VETOR LINHA FORMADO PELOS NÓS CUJO A ANÁLISE É RELEVANTE:[9 10 11 12 13]

m =

    14.0400

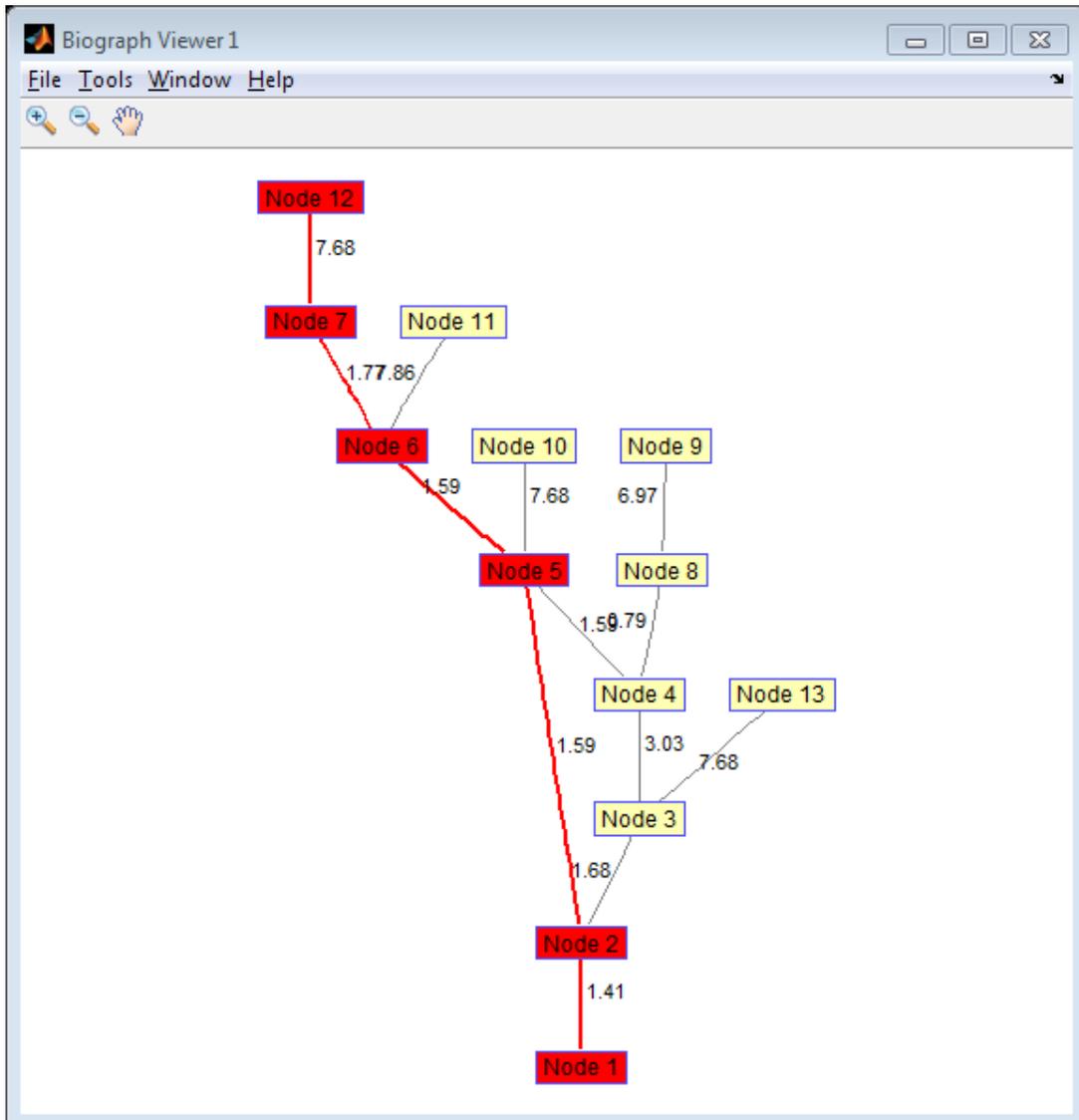
ANÁLISE FINALIZADA COM SUCESSO
fx >>

```

**Fonte: O autor**

E finalmente o grafo com o caminho e o ponto hidráulicamente mais desfavorável.

**Figura 5.9 Solução do caminho hidráulicamente mais desfavorável encontrado pelo programa**



Fonte: O autor

Com o modelo já elaborado, caso a configuração dos pontos não seja alterada, para que outro cenário seja simulado, será necessário apenas atualizar o valor dos pesos.

### 5.3 Funcionamento do programa

Conforme visto anteriormente, o programa solicita apenas quatro entradas para efetuar todas as análises e fornecer dois dados de saída que são: A perda de carga máxima das mínimas e o caminho para atingir o ponto hidráulicamente mais desfavorável. Segue abaixo um fluxograma geral do funcionamento do programa.

Figura 5.10 Funcionamento geral do programa



Fonte: O autor

#### 5.4 Dimensionamento da bomba

Conforme afirma Creder (2006), a bomba hidráulica tem a função de elevar um fluido ou sua pressão, por meio de uma energia mecânica externa, normalmente usam-se motores elétricos. De acordo com o trinômio de Bernoulli, em todo escoamento, a soma das energias de posição, de pressão e de cinética é uma constante entre dois pontos quaisquer da tubulação, adicionada da perda de carga. Expressando essas energias em alturas de coluna de água (mca) tem-se a seguinte equação:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + (\textit{perda de carga}) \quad (5.6)$$

Onde:

$z$  = energia de posição

$p$  = energia de pressão

$\gamma$  = peso específico do fluido

$v$  = velocidade de escoamento

$g$  = aceleração da gravidade

$z + \frac{p}{\gamma}$  = energia potencial

$$\frac{v^2}{2g} = \text{energia cinética}$$

No dimensionamento da altura manométrica da bomba usualmente a parcela relativa à velocidade de recalque é desprezada, fazendo com que a equação fique da seguinte forma.

$$H_{\text{manométrica}} = H_{\text{estática}} + H_{\text{perdas}} \quad (5.7)$$

Vale salientar que pode haver algumas mudanças, de acordo tanto com o propósito do sistema quanto à posição do reservatório. O caso no qual o algoritmo proposto neste trabalho foi aplicado é um sistema de combate a incêndio. E devido a configuração da rede, as energias de posição foram desprezadas, isso significa dizer que as cotas de nível estavam num mesmo nível e, este foi o mesmo nível da bomba. A equação geral para o sistema mencionado deve ser a seguinte:

$$H_{\text{manométrica}} = H_{\text{sucção}} + H_{\text{recalque}} + P_{\text{mangueira}} + P_{\text{útil}} \quad (5.8)$$

No entanto a perda associada à mangueira foi desconsiderada, pois de acordo com a posição do hidrante (se interno ou externo) o comprimento dela definido por lei pode ser alterado. Para efeito de cálculo, a inclusão deste termo é indiferente no que diz respeito à aplicabilidade do algoritmo. Deste modo a equação utilizada foi a seguinte:

$$H_{\text{manométrica}} = H_{\text{sucção}} + H_{\text{recalque}} + P_{\text{útil}} \quad (5.9)$$

Como não haverá mudanças na altura da sucção de acordo com o cenário considerado este valor foi calculado antecipadamente e adicionado a cada cenário. A altura da sucção foi a seguinte:

$$H_{\text{sucção}} = h_{pl+} + h_p \quad (5.10)$$

$$h_{pl} = k_{\text{pé com crivo}} \left( \frac{v^2}{2g} \right) + k_{\text{cotovelo } 90^\circ} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (5.11)$$

$$h_{pl} = 1,4400 \text{ mca}$$

$$h_p = f \frac{L \cdot v^2}{d \cdot 2 \cdot g} = \left\{ \frac{0,25}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \right\} \cdot \left( \frac{L \cdot v^2}{d \cdot 2 \cdot g} \right) = \left\{ \frac{0,25}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{\left( \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \right)^{0,9}} \right) \right]^2} \right\} \cdot \left( \frac{L \cdot v^2}{d \cdot 2 \cdot g} \right) \quad (5.12)$$

$$h_p = 0,02215 \text{ mca}$$

Onde:

$$d = 0,154 \text{ m (tubulação de 6 polegadas)}$$

$$L = 8 \text{ m}$$

$$\varepsilon = 0,00003 \text{ (m) para aço comercial}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{108(\text{m}^3/\text{h}) \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot [0,154(\text{m})]^2} = 1,61 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu = 0,001003 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0,001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \text{ a } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$k_{\text{pé com crivo}} = 10$$

$$k_{\text{cotovelo } 90^\circ} = 0,9$$

Logo,

$$H_{\text{sucção}} = h_{pl+} + h_p = 1,4400 + 0,02215 = 1,4621 \text{ mca}$$

Com esse resultado pode-se reescrever a equação 5.9 como:

$$H_{\text{manométrica}} = 1,4621 + H_{\text{recalque}} + P_{\text{útil}} \quad (5.9)$$

Onde  $H_{\text{recalque}}$  é o valor da perda de carga encontrada nas simulações no MATLAB e  $P_{\text{útil}}$  é a pressão mínima requerida no ponto hidráulicamente mais desfavorável.

Outro parâmetro importante no dimensionamento da bomba é o seu  $NPSH_{Disponível}$ , isto para que sejam evitados todos os males advindos da cavitação. Para o cálculo do NPSH (Net Positive Suction Head) normalmente utiliza-se a seguinte equação.

$$NPSH_{Disponível} = h_{atm} - H_{sucção} - H_{gs} - h_v \quad (5.13)$$

$$h_{atm} = 10,33 \text{ (m)} - 0,00108 * (\text{Altitude local em metros}) \quad (5.14)$$

$$h_{atm} = 10,33 \text{ (m)} - 0,00108 * 10,33 = 10,3188 \text{ mca}$$

$$H_{gs} = \text{Altura geométrica de sucção (m)} (\text{Distância da superfície da água até o eixo da bomba}) \quad (5.15)$$

$$H_{gs} = 2,0 \text{ mca}$$

$$h_v = \text{Carga hidráulica correspondente à pressão de vapor do líquido bombeado (m)} \quad (5.16)$$

$$h_v = 0,33 \text{ a } 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Logo,

$$NPSH_{Disponível} = 10,3188 - 1,4621 - 2,0000 - 0,3300 = 6,5267 \text{ mca}$$

Para finalizar o dimensionamento da bomba foi necessário definir a sua potência. Usualmente a potência da bomba é calculada por meio da seguinte expressão:

$$P = \frac{1.000 * H_{manométrica} * Q}{75 * \eta * 3.600} \quad (5.17)$$

Onde:

$$P = \text{Potência (CV)}$$

$$H_{manométrica} = \text{Altura manométrica (mca)}$$

$$\eta = \text{Rendimento (\%)}, \text{ valor normalmente definido pelo fabricante}$$

## 5.5 Cálculo do custo da tubulação

O cálculo do custo da tubulação foi inserido pela necessidade de se ter uma estimativa do peso dele em relação aos demais elementos do sistema. O custo da tubulação considerado foi apenas uma estimativa, onde os valores são minorados, isto devido ao fato de não serem considerados elementos de sustentação, e nem os

elementos de ligação. Além de tornar a análise mais simples a decisão de desconsiderar esses valores serve para mostrar que mesmo considerando o mínimo dos custos associados a tubulação ela tem um impacto considerável no custo como um todo. O custo das tubulações foi calculado tomando por base o preço médio do quilograma do aço carbono. A equação utilizada foi a seguinte:

$$Custo(\$) = 3 * \left\{ \rho_{aço} * \left[ \frac{1}{4} * \pi * (D_{externo}^2 - d_{interno}^2) \right] * L \right\} \quad (5.18)$$

Onde:

$3 =$  Preço do do kg de aço em dolar (\$/kg)

$\rho_{aço} =$  Densidade do aço ( $kg/m^3$ ) =  $7.860 kg/m^3$

$D_{externo} =$  Diâmetro externo do tubo (m)

$d_{interno} =$  Diâmetro interno do tubo (m)

$L =$  Comprimento do tubo (m)

Os diâmetros, interno e externo dependerão da espessura da parede do tubo (schedule) que pode ser consultado em tabelas. Para as tubulações usadas neste trabalho o schedule considerado é 40.

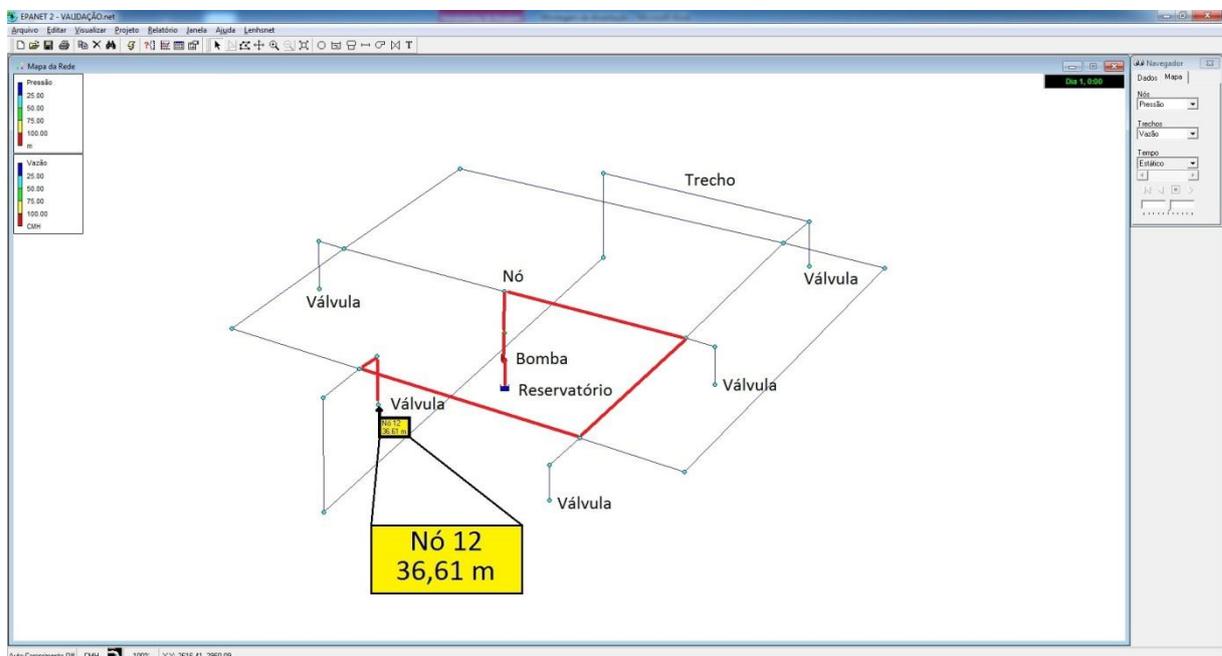
## 6 Validação

Nesta etapa buscou-se analisar a mesma rede mostrada na metodologia por meio do EPANET 2.0, visando confrontar os resultados e validar os resultados obtidos por meio da metodologia proposta neste texto. Conforme mencionado anteriormente, existem programas que se propõem a resolver problemas de análise de redes por meio de métodos híbridos. O EPANET é um dos programas que se propõe a resolver estes tipos de problemas, por este motivo a rede foi simulada no EPANET 2.0 com o intuito de compor esta validação.

### 6.1 Validando usando o EPANET 2.0

De acordo com o exposto na metodologia, o sistema em questão é composto por um conjunto de tubos, um reservatório, uma bomba e 5 válvulas que representam os pontos de consumo. A figura 6.1 mostra o sistema descrito já inserido no ambiente do EPANET 2.0.

**Figura 6.1 Rede hidráulica analisada na metodologia inserida no ambiente do EPANET 2.0**



**Fonte: O autor**

As tubulações consideradas são de 4 polegadas, compostas de aço carbono. O consumo considerado para o ponto destacado é uma vazão de 108 (m<sup>3</sup>/h). Nesta simulação o sistema considerou o consumo apenas no ponto em destaque. O ponto

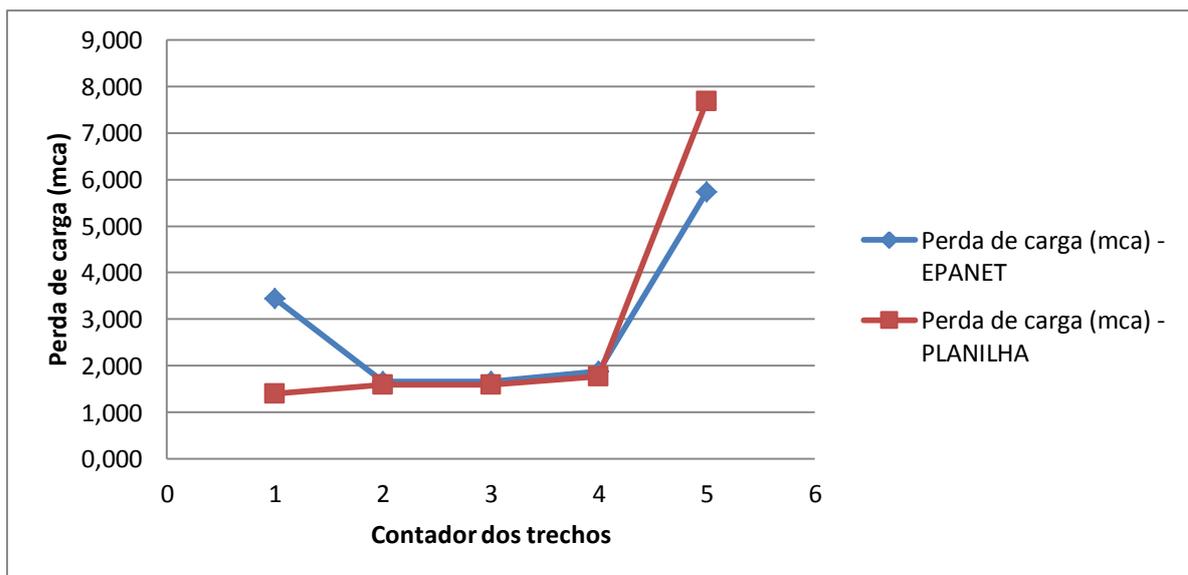
mencionado é o mesmo encontrado como o ponto hidráulicamente mais desfavorável, por meio da simulação usando o algoritmo do grafo.

As características do cenário estão disponíveis na íntegra no apêndice B deste trabalho. Nele constam os comprimentos de cada trecho, os valores das constantes utilizadas e todas as características dos elementos presentes no modelo. De posse do cenário mencionado basta apenas importar o arquivo no formato (.txt) para o EPANET 2.0 e ele exibe o cenário conforme mostrado na figura 6.1 (anterior). Deste modo a simulação pode ser replicada a título de conferência por parte do leitor.

### 6.1.1 Resultados obtidos

Com os resultados provenientes das simulações realizadas pelos dois métodos puderam-se gerar os gráficos apresentados na figura 6.2:

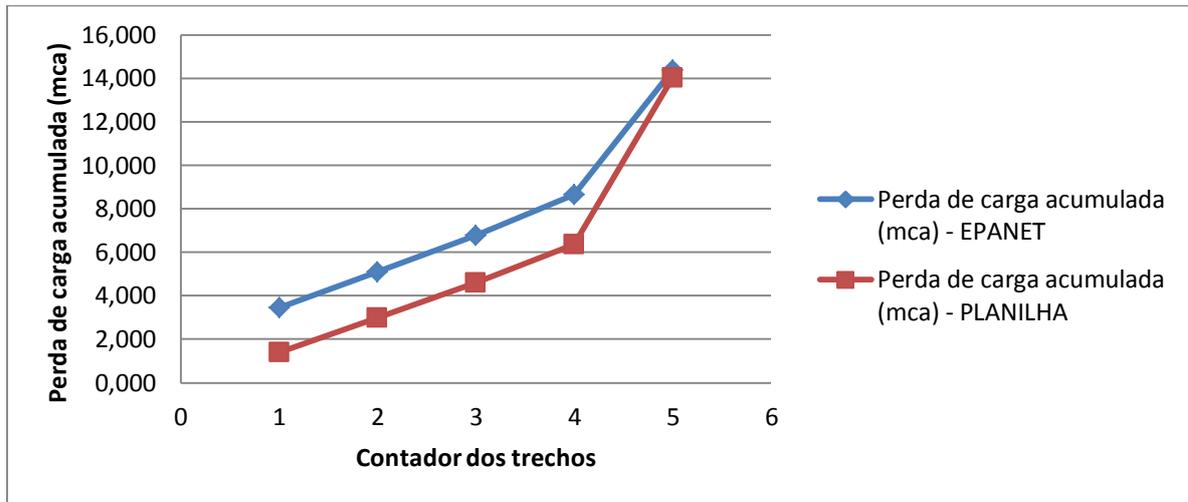
Figura 6.2 Gráfico Comparativo dos resultados das perdas de carga obtidos pelos dois métodos



Fonte: O autor

Neste primeiro caso constam os valores das perdas de carga obtidas para cada trecho que conduz até o ponto hidráulicamente mais desfavorável. Pode-se notar as diferenças existentes nos valores inicial e final. Essas diferenças ocorreram devido ao fato da planilha não considerar a variação da cota geométrica. Desta forma as subidas são encaradas como uma perda maior para o EPANET 2.0 e as descidas tem uma perda maior na planilha. Uma outra forma de análise da perda de carga foi a perda de carga acumulada. O gráfico apresentado na figura 6.3 mostra os valores encontrados nos dois métodos.

**Figura 6.3 Gráfico Comparativo das perdas de carga acumuladas obtidas pelos dois métodos**



Fonte: O autor

Pode-se observar que quando considerados os valores acumulados, os efeitos da diferença de nível dos pontos se anularam, no entanto nos casos mais gerais deve-se prestar atenção se a variação total no nível dos pontos inicial e final são muito representativas. Neste caso deve-se adicionar ou retirar do valor da perda de carga considerada na planilha o valor da diferença encontrada. Segue abaixo uma tabela comparativa dos valores encontrados pelos dois métodos.

**Tabela 6.1 Comparativo dos métodos**

Arestas	Trechos	Perda de carga (mca) acumulada -Planilha	Perda de carga (mca) acumulada -EPANET 2.0	Erro(%)
1-2	1	1,406	3,443	144,9
2-5	2	2,996	5,108	70,5
4-5	3	4,586	6,774	47,7
6-7	4	6,360	8,660	36,2
7-12	5	14,036	14,390	2,5

Fonte: O autor

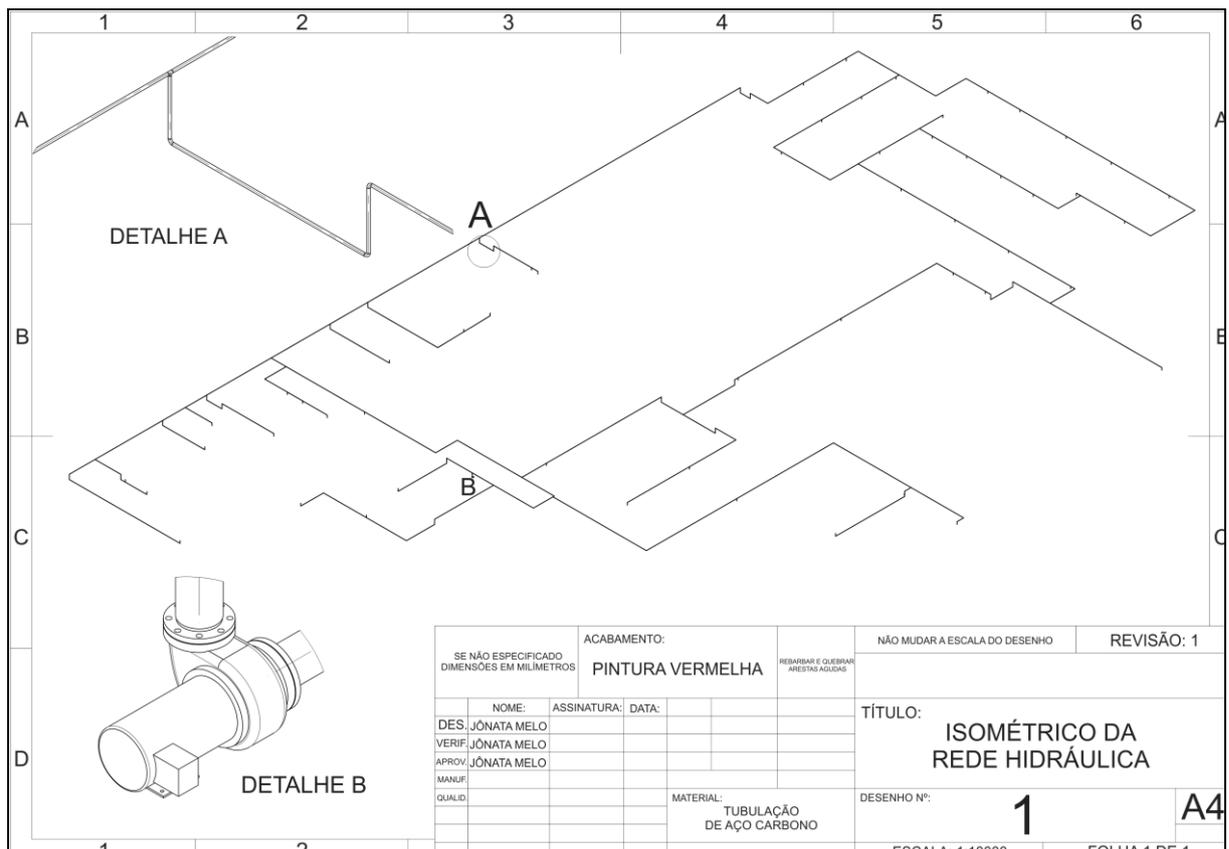
Os resultados obtidos no modelo em questão foram considerados satisfatórios tendo em vista que os resultados obtidos apresentaram uma diferença de aproximadamente 2,5%. Este erro é bastante aceitável tendo em vista que as bombas são fornecidas apenas em alturas manométricas comerciais.

## 7 Estudo de Caso

A proposta deste estudo de caso é avaliar uma rede hidráulica real, com o intuito de minimizar os erros e o tempo despendido nas análises, por meio do emprego de uma metodologia baseada na modelagem da rede como um grafo ponderado não direcionado.

A rede estudada trata-se de uma rede de combate à incêndio com 53 hidrantes, no entanto a mesma técnica também se aplica a outros tipos de sistemas hidráulicos. O sistema deve ser composto por tubulações de aço carbono, e os caminhos por onde a rede percorrerá bem como o posicionamento das válvulas já foram determinados em conformidade com as exigências legais da NBR 13714. A rede teve a configuração apresentada na figura 7.1.

**Figura 7.1 Rede hidráulica do estudo de caso**



Fonte: O autor

## 7.1 Determinação da vazão e pressão de operação

Conforme mencionado no tópico anterior, por se tratar de um sistema de combate a incêndio, existem rígidas exigências legais para que a rede seja aprovada pelo corpo de bombeiros local. A norma na qual os sistemas de combate a incêndio da maioria das indústrias instaladas no Brasil devem seguir é a NBR 13714 (Sistema de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio), sendo estas complementadas pelas normas da seguradora. Esta norma estabelece os requisitos mínimos de operação e dimensionamento de todos os elementos constituintes de um sistema de hidrantes e mangotinhos. Vale salientar que o foco deste estudo de caso é a implementação de uma nova metodologia de análise de sistemas hidráulicos industriais. Isto explica o fato de não se adentrar nos pormenores legais de dimensionamento de redes de combate a incêndio, utiliza-se apenas os trechos da norma que possibilitaram a definição da pressão e vazão de operação da rede.

A pressão e vazão de operação da rede são dimensionadas considerando a operação de dois jatos de água operando simultaneamente nos pontos hidráulicamente mais desfavoráveis. De acordo com a norma da seguradora, os níveis de vazão e pressão nos pontos mais desfavoráveis são definidos de acordo com a classe de ocupação e o risco da atividade, conforme quadro abaixo:

**Tabela 7.1 Vazões e pressões requeridas**

CLASSES DE PROTEÇÃO	VAZÃO EM CADA REQUINTE	REQUINTE:			DIÂMETRO DA MANGUEIRA
		PRESSÃO:			
CLASSE A	12(m <sup>3</sup> /h)	16(mm)	13(mm)		38(mm)
		15(mca)	35(mca)		
CLASSE B	30(m <sup>3</sup> /h)	25(mm)	22(mm)	19(mm)	63(mm)
		15(mca)	25(mca)	45(mca)	
CLASSE C	54(m <sup>3</sup> /h)	<b>32(mm)</b>	28(mm)	25(mm)	<b>63(mm)</b>
		<b>20(mca)</b>	30(mca)	45(mca)	

**Fonte:** Adaptado da norma da seguradora

Portanto, de acordo com o quadro acima se extrai a vazão e pressão mínimas de operação, sendo estas:

$$Q = 54 * 2 = 108 \text{ (m}^3\text{/h)};$$

$$P = 20 \text{ (mca)}$$

É de suma importância notar que para dois hidrantes abertos simultaneamente a bomba precisa do dobro da vazão para que a relação entre a pressão e a vazão seja pelo menos igual às requeridas no quadro acima.

## 7.2 Modelagem

De acordo com a descrição mostrada no tópico anterior às considerações acerca do modelo bem como as hipóteses adotadas seguem a seguir:

### — Descrição da rede

A rede considerada no estudo de caso é uma rede formada com tubulações de aço carbono com diâmetro variando entre 4 e 6 polegadas. Tem uma extensão aproximada de 4.300 metros de tubos.

### — Tipologia da rede

A tipologia da rede é mista, ou seja, ela é parte ramificada e parte em malha.

### — Função da rede

A rede foi projetada para operar como uma rede de combate e proteção contra incêndio.

### — Características do fluido transportado

O fluido transportado na tubulação foi água a aproximadamente 25 °C.

### — Pressão e vazão de operação

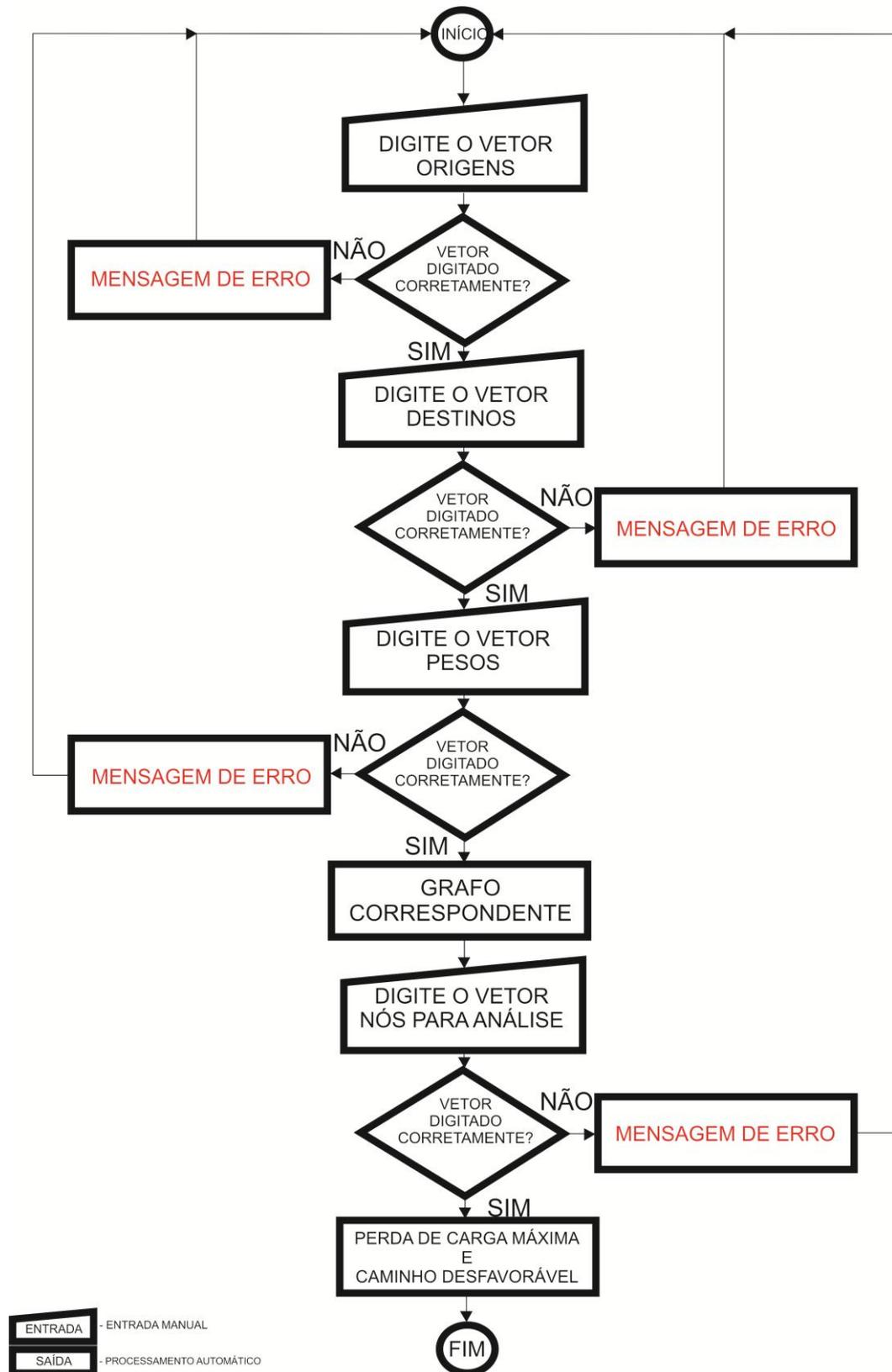
A vazão considerada no trabalho é 108 m<sup>3</sup>/h, e a pressão no ponto mais desfavorável é 20 mca.

### — Hipóteses do modelo

Cota geométrica constante; não há redistribuição das vazões; o nível do reservatório é constante; não há tubos curtos; regime de escoamento turbulento; há uma única unidade de pressurização (bomba) próxima ao reservatório.

O algoritmo para a aplicação proposta neste trabalho é facilmente compreendido no decorrer de sua aplicação neste estudo de caso, no entanto visando melhorar o seu entendimento segue na figura 7.2 o fluxograma dele:

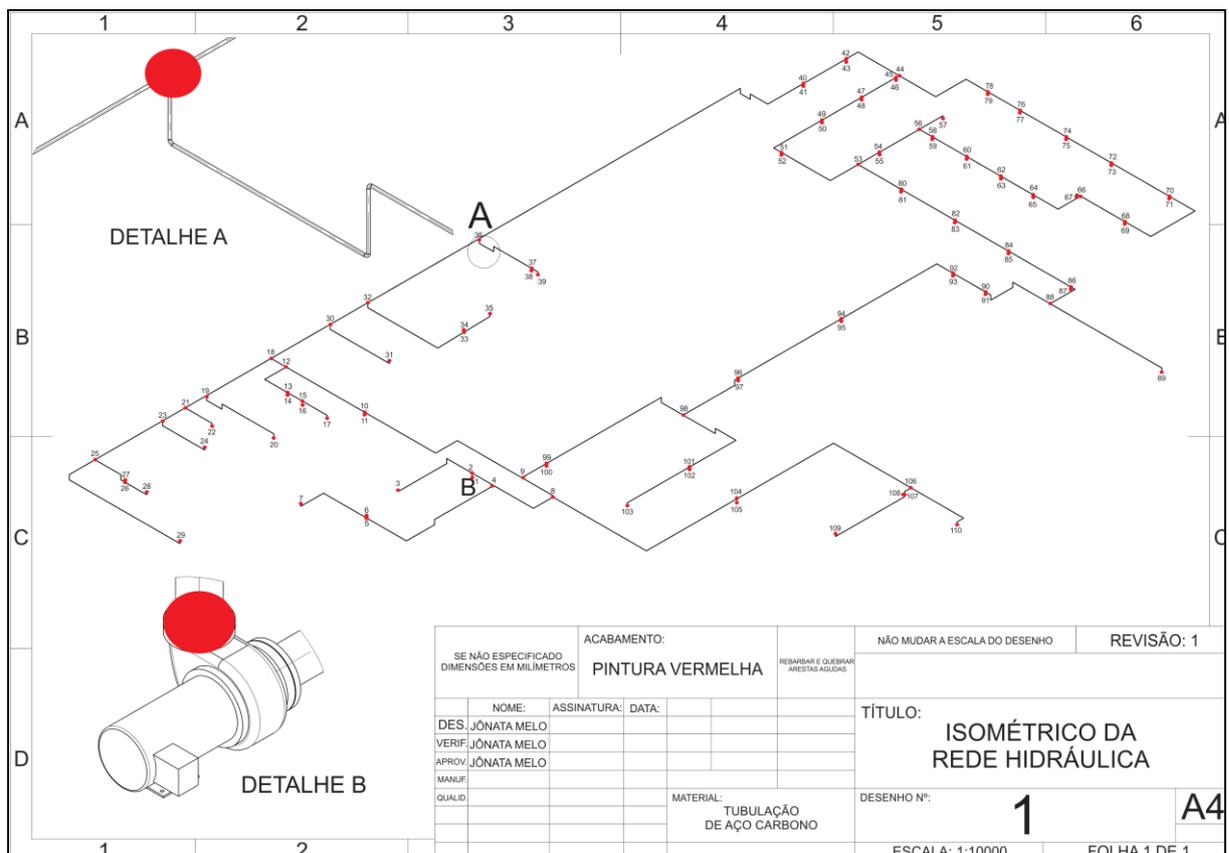
Figura 7.2 Fluxograma do programa desenvolvido



## 7.2.1 Elaboração do grafo correspondente

O grafo correspondente nada mais é do que uma representação alternativa da rede, visando facilitar a sua compreensão e análise. A conversão se iniciou com a marcação de pontos no isométrico da rede, foi marcado preferencialmente onde há mais de uma alternativa para o fluxo hidráulico. Estes pontos representam os nós ou vértices do grafo correspondente. Segue abaixo a figura 7.3 que ilustra esta etapa.

**Figura 7.3 Rede hidráulica do estudo de caso com pontos marcados**



Fonte: O autor

De posse do isométrico com a distribuição dos pontos foi possível gerar os vetores solicitados no algoritmo de análise da rede. O primeiro vetor solicitado foi batizado como vetor das origens, ele é formado por todos os nós que representam os vértices ou nós de onde as arestas partem. Neste estudo de caso o vetor das origens é o seguinte:

$$\bar{A} = [1 \ 2 \ 2 \ 4 \ 5 \ 5 \ 4 \ 8 \ 8 \ 104 \ 104 \ 106 \ 107 \ 107 \ 106 \ 9 \ 10 \ 10 \ 12 \ 13 \ 13 \ 15 \ 15 \ 12 \ 18 \ 19 \ 19 \ 21 \ 21 \ 23 \ 23 \ 25 \ 26 \ 26 \ 25 \ 18 \ 30 \ 30 \ 32 \ 33 \ 33 \ 32 \ 36 \ 37 \ 37 \ 36 \ 40 \ 40 \ 42 \ 42 \ 44 \ 45 \ 45 \ 47 \ 47 \ 49 \ 49 \ 51 \ 51 \ 53 \ 54 \ 54 \ 56 \ 56 \ 58 \ 58 \ 60 \ 60 \ 62 \ 62 \ 64 \ 64 \ 66 \ 66 \ 68 \ 68 \ 70 \ 70 \ 72 \ 72 \ 74$$

74 76 76 78 78 53 80 80 82 82 84 84 86 86 88 88 90 90 92 92 94 94 96 96 98 99 99  
98 101 101]

Em seguida o programa solicita que o usuário entre com um novo vetor denominado vetor dos destinos, eles representam os vértices onde as arestas incidem. Para este exemplo o vetor de destinos é o seguinte:

$\bar{B} = [2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 104\ 105\ 106\ 107\ 108\ 109\ 110\ 10\ 11\ 12\ 13\ 14\ 15\ 16\ 17\ 18\ 19\ 20$   
 $21\ 22\ 23\ 24\ 25\ 26\ 27\ 28\ 29\ 30\ 31\ 32\ 33\ 34\ 35\ 36\ 37\ 38\ 39\ 40\ 41\ 42\ 43\ 44\ 45\ 46\ 47$   
 $48\ 49\ 50\ 51\ 52\ 53\ 54\ 55\ 56\ 57\ 58\ 59\ 60\ 61\ 62\ 63\ 64\ 65\ 66\ 67\ 68\ 69\ 70\ 71\ 72\ 73\ 74$   
 $75\ 76\ 77\ 78\ 79\ 44\ 80\ 81\ 82\ 83\ 84\ 85\ 86\ 87\ 88\ 89\ 90\ 91\ 92\ 93\ 94\ 95\ 96\ 97\ 98\ 99$   
 $100\ 9\ 101\ 102\ 103]$

Note que na maioria dos casos, os nós de destino da aresta anterior torna-se nó de origem na aresta subsequente, isto se faz necessário para que haja a continuidade do grafo.

O próximo vetor solicitado pelo programa é o denominado vetor dos pesos. Este vetor é de suma importância, pois é ele que define nosso grafo como ponderado, e isto permite que o algoritmo compute e compare os caminhos de acordo com o somatório dos pesos. Este vetor representa fisicamente as perdas de carga existente entre dois vértices. O próximo tópico é destinado à explicação de como este vetor foi gerado. Segue abaixo o vetor dos pesos para a tubulação toda com diâmetro nominal de 4 polegadas:

$\bar{C} = [1.50\ 15.52\ 3.06\ 14.27\ 6.97\ 13.80\ 6.07\ 3.87\ 17.55\ 6.97\ 16.73\ 2.57$   
 $6.82\ 14.26\ 13.25\ 15.87\ 6.97\ 7.93\ 5.60\ 6.97\ 2.51\ 6.97\ 9.70\ 2.51\ 6.74$   
 $15.85\ 3.06\ 9.88\ 3.15\ 12.15\ 7.01\ 5.39\ 6.97\ 9.42\ 20.85\ 6.28\ 13.62\ 4.44$   
 $10.99\ 6.97\ 9.88\ 10.78\ 8.20\ 6.97\ 8.14\ 32.68\ 6.97\ 4.90\ 6.97\ 6.34\ 1.50$   
 $6.97\ 4.16\ 6.97\ 4.62\ 6.97\ 6.61\ 6.97\ 7.45\ 3.06\ 6.97\ 3.81\ 9.61\ 2.33$   
 $6.97\ 4.16\ 6.97\ 4.16\ 6.97\ 3.98\ 6.97\ 5.88\ 7.95\ 4.99\ 6.97\ 10.63\ 6.97$   
 $6.19\ 6.97\ 5.08\ 6.97\ 5.18\ 6.97\ 3.98\ 6.97\ 9.17\ 4.90\ 6.97\ 5.82\ 6.97$   
 $5.82\ 6.97\ 6.55\ 6.97\ 3.70\ 17.15\ 9.92\ 6.97\ 3.98\ 6.97\ 11.39\ 6.97\ 10.05$   
 $6.97\ 7.50\ 14.49\ 6.97\ 3.34\ 11.88\ 6.97\ 12.92]$

É importante mencionar que o vetor pesos é o único vetor alterado quando é avaliado um novo cenário com tubulações de diâmetros diferentes. Vale salientar também que os vetores peso considerados nas simulações têm 10 algarismos significativos visando minimizar os erros de truncamento.

Deste modo, convertendo os pontos em nós e as tubulações em arestas o programa foi capaz de gerar o grafo apresentado na figura 7.4:

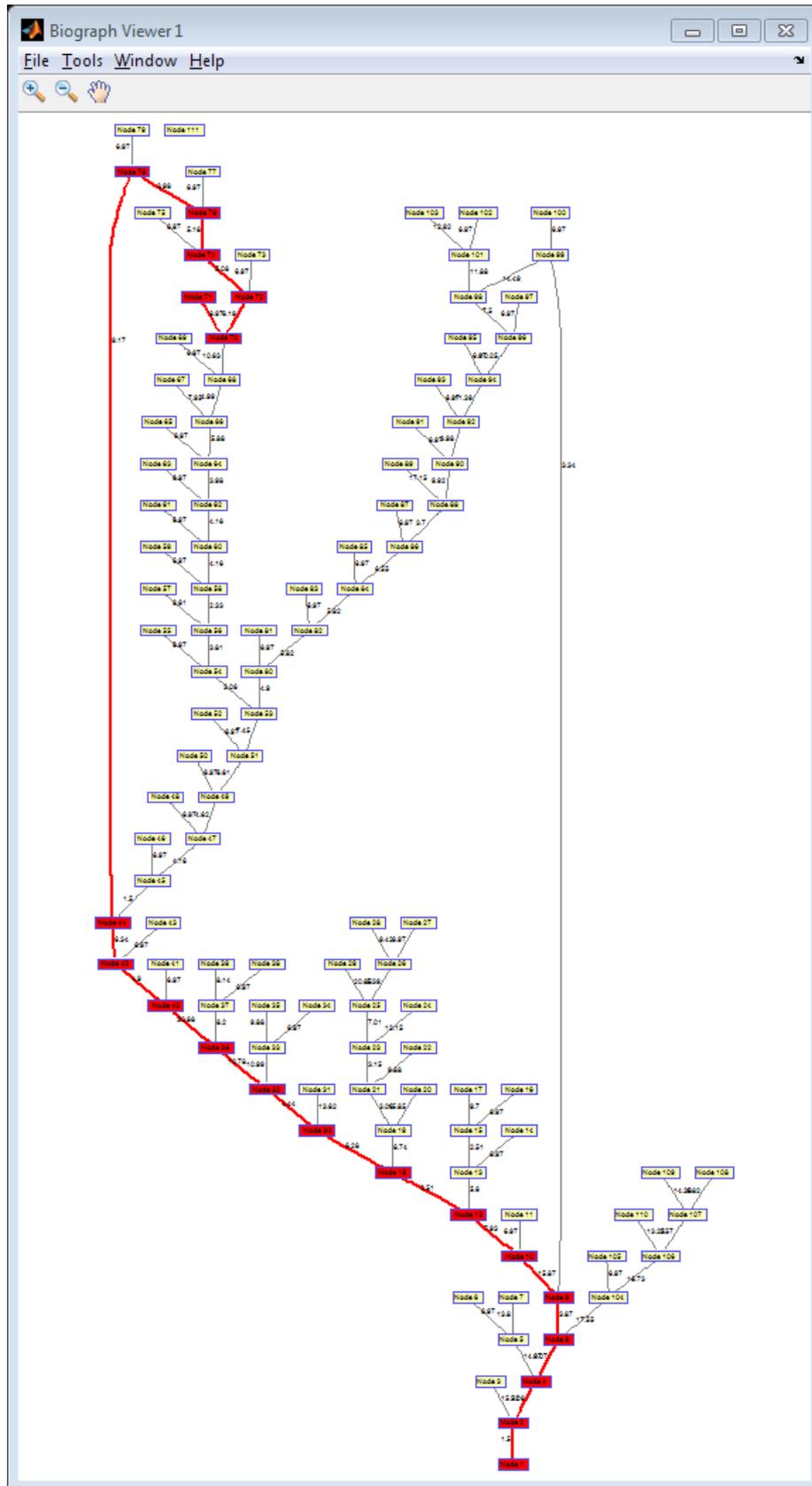


Este grafo é exibido logo depois da entrada do vetor peso. Em seguida o programa pede que o usuário digite um novo vetor que representa os nós para análise. Neste caso entra-se com um vetor que representa todos os hidrantes. Deste modo o programa verifica todos os pontos de consumo. Segue abaixo o vetor mencionado:

Nós para análise = [3 6 7 11 14 16 17 20 22 24 27 28 29 105 108 109 110 31 34 35 38 39 41 43 46 48 50 52 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85 87 89 91 93 95 97 100 102 103]

A partir desta entrada o programa exibe a perda de carga e o caminho hidráulicamente mais desfavorável, conforme mostrado no grafo da figura 7.5:

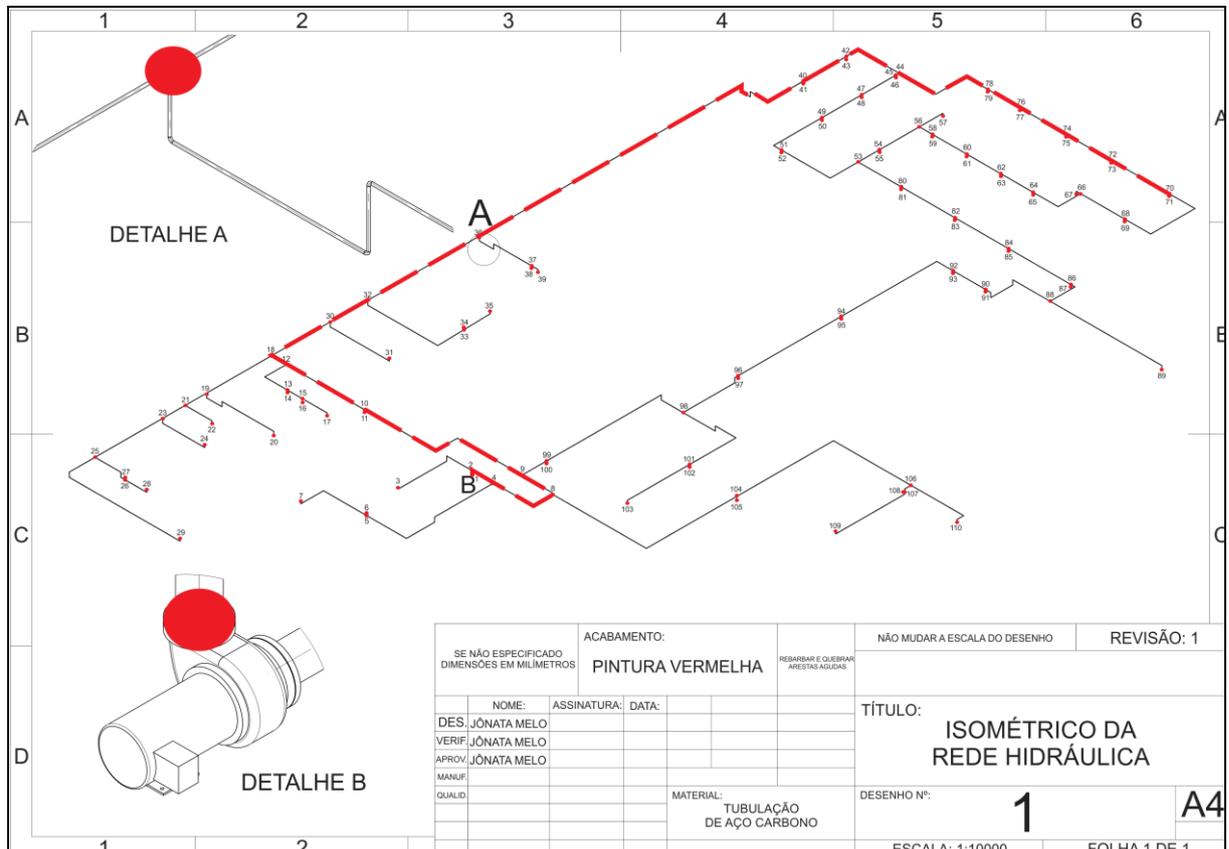
Figura 7.5 Caminho hidráulicamente mais desfavorável encontrado pelo programa



Fonte: O autor

Usando as informações de saída do programa mostradas acima foi possível convertê-las para o modelo real obtendo deste modo a representação física do caminho, conforme mostrado na figura 7.6.

**Figura 7.6 Rede hidráulica com caminho hidráulicamente mais desfavorável em destaque**



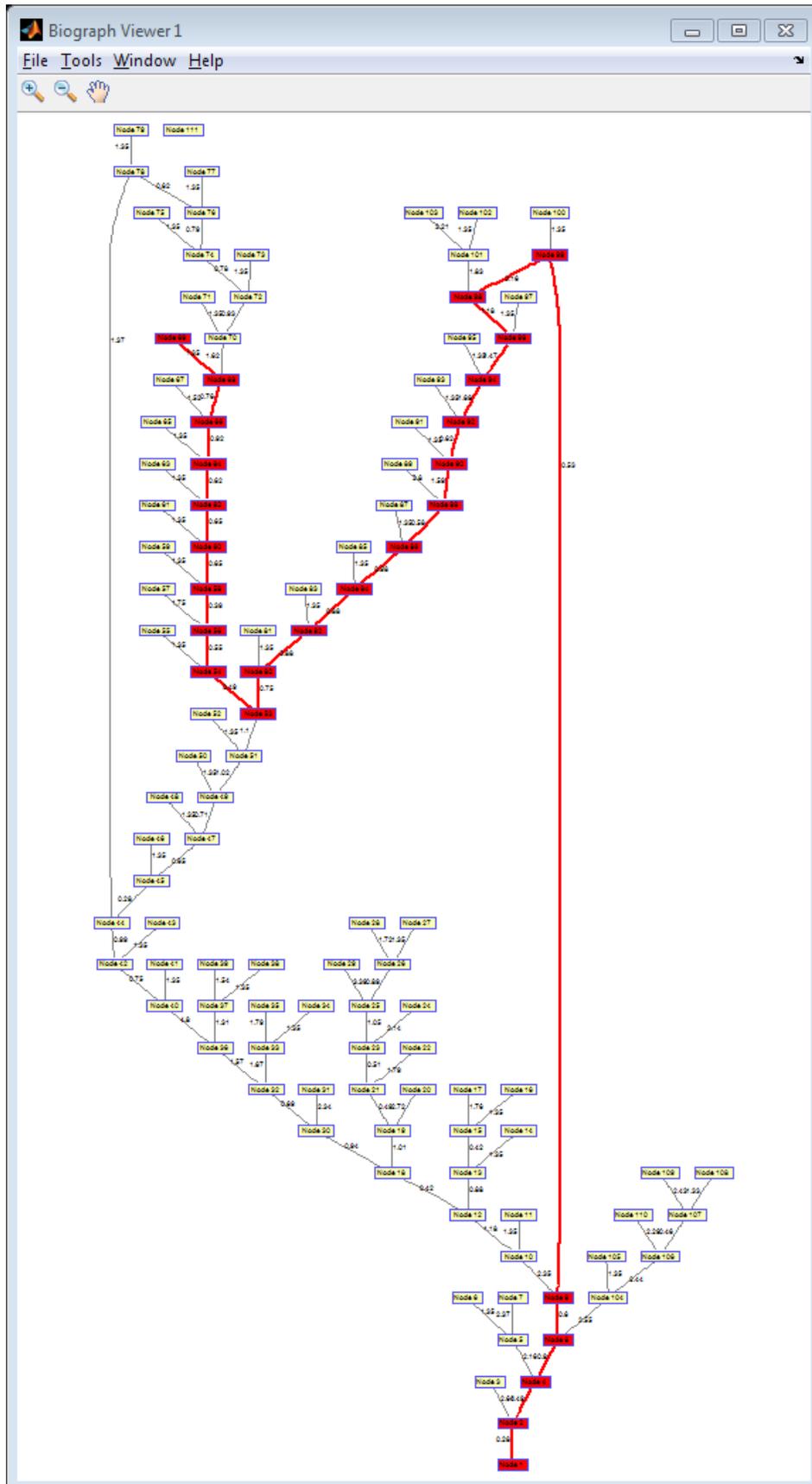
Fonte: O autor

Este caminho mostrado no isométrico é hidráulicamente mais desfavorável considerando a tubulação com um diâmetro de 4 polegadas. A fim de analisar o impacto que o dimensionamento causa tanto na perda de carga quanto no custo das tubulações, simularam-se três cenários distintos, sendo estes:

- Rede com tubulação de 4 polegadas;
- Rede com tubulações de 6 polegadas e
- Rede com tubulação do caminho crítico dos primeiros casos com 6, e as demais com 4 polegadas (Tubulação mista)

De posse dos resultados da simulação anterior e alterando o diâmetro da tubulação na planilha de cálculo das perdas de carga de 4 polegadas para 6, pôde-se obter um novo valor para o vetor dos pesos, deste modo foi possível gerar o cenário a seguir.

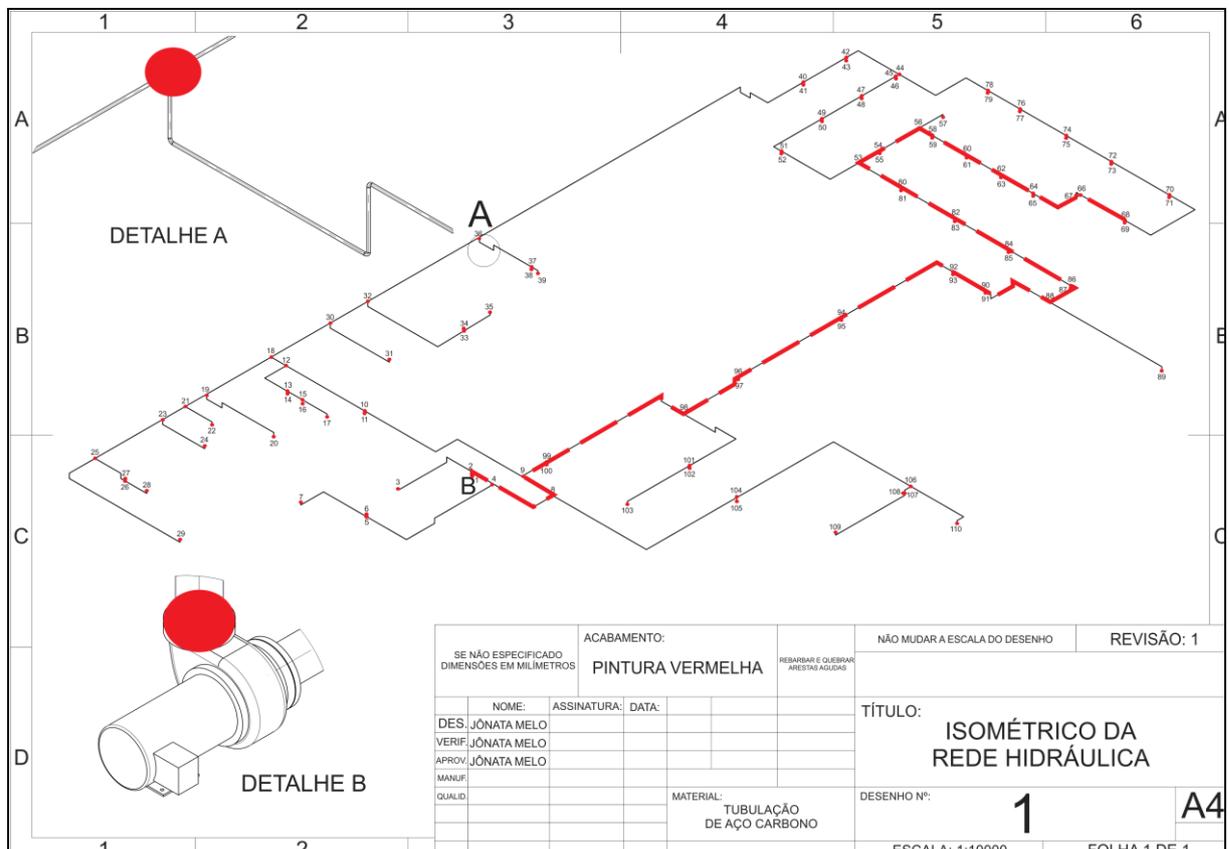
Figura 7.7 Caminho hidráulicamente mais desfavorável encontrado para rede com tubulação de 6 polegadas



Fonte: O autor

Convertendo as informações de saída do programa foi possível converter este resultado para o isométrico conforme apresentado na figura 7.8.

**Figura 7.8 Caminho hidráulicamente mais desfavorável para tubulação de 6 polegadas**

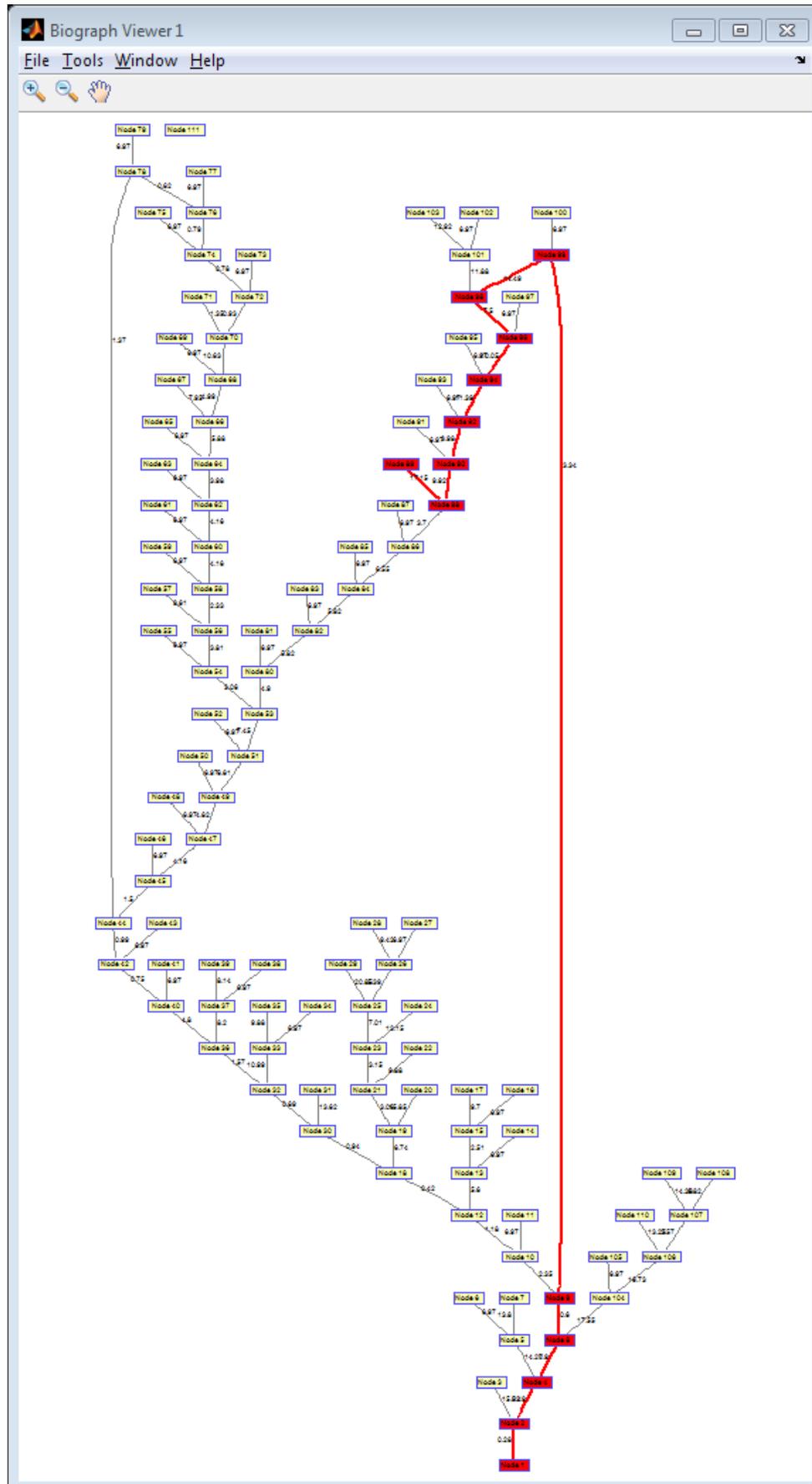


Fonte: O autor

Conforme observado no isométrico acima, pode-se notar que apesar da tubulação permanecer com o diâmetro constante, o ponto hidráulicamente mais desfavorável mudou de lugar. Isto ocorreu, pois o cálculo da perda de carga localizada cresce na proporção do quadrado da velocidade do escoamento, e quando a tubulação considerada era de 4 polegadas, a velocidade média era de aproximadamente 3,64 m/s, contra uma velocidade média de 1,61 m/s, isso implica que quando considerado o quadrado das duas velocidades, o impacto das perdas de carga localizadas tornam-se cada vez mais significativo para velocidades superiores a 2,0 m/s fazendo assim do caminho com maior quantidade de elementos de ligação o de maior perda de carga.

Na figura 7.9 segue o resultado do grafo simulado para o caso onde a tubulação considerada é mista.

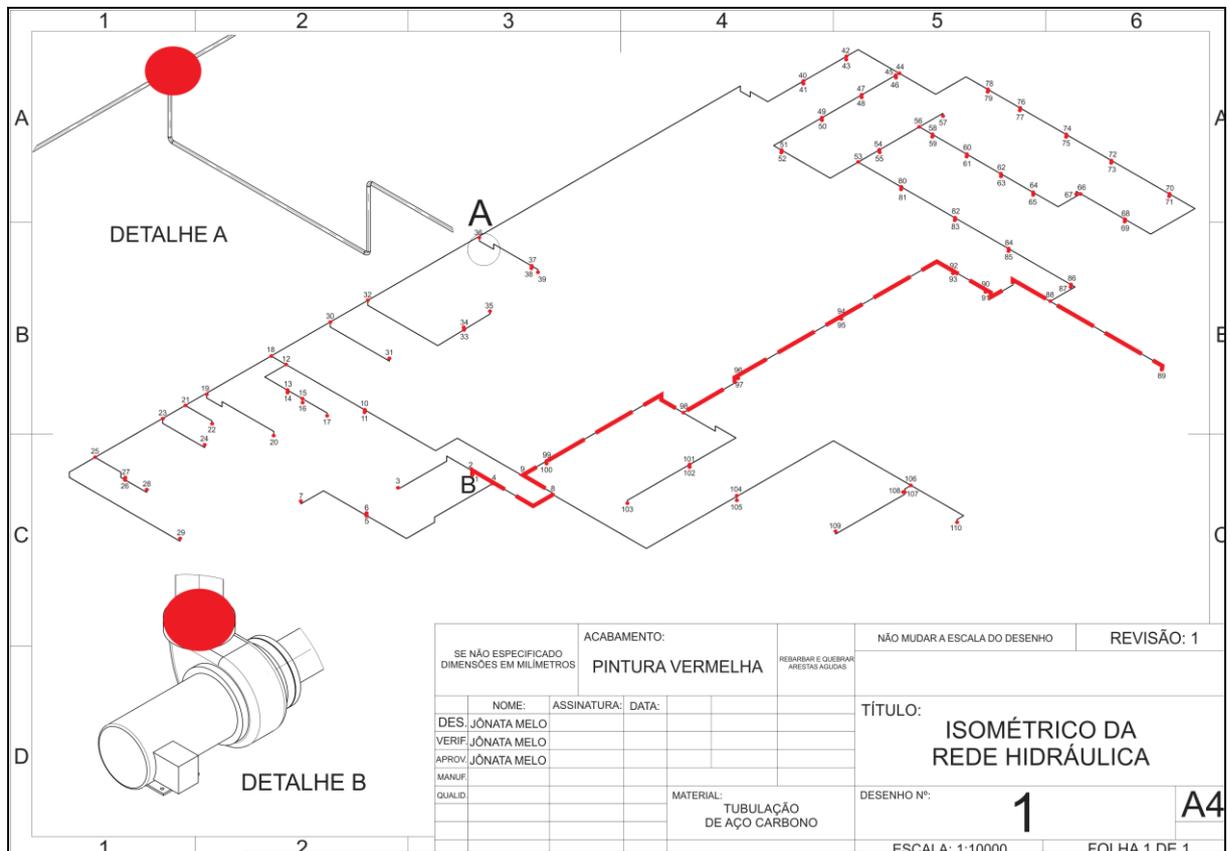
Figura 7.9 Caminho hidráulicamente mais desfavorável para tubulação com diâmetro misto



Fonte: O autor

Assim como no caso anterior, convertendo o caminho encontrado no grafo para o modelo físico real encontrou-se a seguinte configuração.

**Figura 7.10 Caminho hidráulicamente mais desfavorável para tubulação com diâmetro misto**



Fonte: O autor

Com base nestes resultados pôde-se dimensionar as bombas para cada cenário e avaliar tanto os custos de instalação quanto de operação de um modo mais confiável e sistemático.

### 7.2.2 Cálculo dos pesos (perdas de carga)

Conforme sugerido ao longo do texto, utilizou-se o critério da perda de carga para dimensionamento, tanto das tubulações quanto das bombas. O cálculo das perdas de carga também foi sistematizado por meio da aplicação de uma planilha. Os dados de entrada para que a planilha calcule tanto a perda de carga quanto a velocidade são:

- Trecho;
- Vazão;

- Acessórios do trecho (para cálculo da perda de carga localizada);
- Comprimento da tubulação e
- Diâmetro da tubulação

A figura 7.11 apresenta um exemplo da planilha mencionada acima.

Figura 7.11 Planilha de cálculo das perdas de carga

PERDA DE CARGA DO SISTEMA																		
CRITÉRIO VELOCIDADE						QUANTIDADE DAS CONEXÕES DA LINHA				CRITÉRIO DA PERDA DE CARGA								CUSTO
TRECHO	V (m/s)	Q (m³/h)	Dcalc (mm)	Dad (pol)	epsilon	Curva 90°	"T" de saída lateral	"T" de passagem direta	Registro de gaveta aberto	V (m/s)	Q (m³/h)	Dad (mm)	Lr (m)	ΔP <sub>L</sub> (mca)	ΔP (mca)	f	Re	
1-2	2	108	138,19766	6"	0,00003		1			1,6106	108	154	3	0,237987	0,276512	0,014957	247291,8	257,85
2-3	2	108	138,19766	6"		3			1	1,6106	108	154	75	1,679131	2,642250	0,014957	247291,8	6446,25
2-4	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	20	0,237987	0,494819	0,014957	247291,8	1719
4-5	2	108	138,19766	6"		3	1			1,6106	108	154	122	0,594968	2,161642	0,014957	247291,8	10485,9
5-6	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
5-7	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	63	1,560137	2,369158	0,014957	247291,8	5414,85
4-8	2	108	138,19766	6"		1		1		1,6106	108	154	55	0,198323	0,904610	0,014957	247291,8	4727,25
8-9	2	108	138,19766	6"		1		1		1,6106	108	154	31	0,198323	0,596412	0,014957	247291,8	2664,45
8-104	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	171	0,356981	2,552893	0,014957	247291,8	14697,45
104-105	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
104-106	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	162	0,356981	2,437318	0,014957	247291,8	13923,9
106-107	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	8	0,356981	0,459713	0,014957	247291,8	687,6
107-108	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	0,3	1,322150	1,326003	0,014957	247291,8	25,785
107-109	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	68	1,560137	2,433366	0,014957	247291,8	5844,6
106-110	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	57	1,560137	2,292108	0,014957	247291,8	4899,15
9-10	2	108	138,19766	6"		2	1			1,6106	108	154	146	0,475974	2,350846	0,014957	247291,8	12548,7
10-11	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
10-12	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	73	0,237987	1,175423	0,014957	247291,8	6274,35
12-13	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	41	0,356981	0,883486	0,014957	247291,8	3523,95
13-14	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
13-15	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	14	0,237987	0,417769	0,014957	247291,8	1203,3
15-16	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
15-17	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	25	1,441144	1,762184	0,014957	247291,8	2148,75
12-18	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	14	0,237987	0,417769	0,014957	247291,8	1203,3
18-19	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	60	0,237987	1,008482	0,014957	247291,8	5157
19-20	2	108	138,19766	6"		4			1	1,6106	108	154	72	1,798125	2,722719	0,014957	247291,8	6188,4
19-21	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	20	0,237987	0,494819	0,014957	247291,8	1719
21-22	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	27	1,441144	1,787867	0,014957	247291,8	2320,65
21-23	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	21	0,237987	0,507660	0,014957	247291,8	1804,95
23-24	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	45	1,560137	2,138009	0,014957	247291,8	3867,75
23-25	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	63	0,237987	1,047007	0,014957	247291,8	5414,85
25-26	2	108	138,19766	6"		2	1			1,6106	108	154	32	0,475974	0,886905	0,014957	247291,8	2750,4
26-27	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
26-28	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	22	1,441144	1,723659	0,014957	247291,8	1890,9
25-29	2	108	138,19766	6"		3			1	1,6106	108	154	133	1,679131	3,387063	0,014957	247291,8	11431,35
18-30	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	55	0,237987	0,944275	0,014957	247291,8	4727,25
30-31	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	61	1,560137	2,343474	0,014957	247291,8	5242,95
30-32	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	35	0,237987	0,687443	0,014957	247291,8	3008,25
32-33	2	108	138,19766	6"		2	1			1,6106	108	154	93	0,475974	1,670242	0,014957	247291,8	7993,35
33-34	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9

Fonte: O autor

### 7.3 Dimensionamento das bombas

Conforme mencionado na metodologia a expressão utilizada para o cálculo da altura manométrica da bomba foi a seguinte.

$$H_{manométrica} = H_{sucção} + H_{recalque} + P_{útil} \quad (5.9)$$

Foi demonstrado que para o nosso estudo de caso tal expressão se reduziria a:

$$H_{manométrica} = 1,4621 + H_{recalque} + P_{útil}$$

Deste modo substituindo os valores da  $P_{útil}$  e  $H_{recalque}$  pelos da pressão mínima definida pela norma e pela perda de carga encontrada na análise do grafo, respectivamente, pode-se obter a altura manométrica da bomba para cada cenário proposto. Vale salientar que as bombas dimensionadas devem ter um  $NPSH \leq 6,5$  mca. Sendo assim, os cenários propostos demandam bombas com as seguintes características:

$$\text{Cenário 1: } H_{manométrica} = 1,4621 + 142,8016 + 20 = 164,2637 \text{ mca}$$

$$\text{Cenário 2: } H_{manométrica} = 1,4621 + 21,9960 + 20 = 43,4581 \text{ mca}$$

$$\text{Cenário 3: } H_{manométrica} = 1,4621 + 80,0830 + 20 = 101,5451 \text{ mca}$$

### 7.4 Resultados obtidos

Conforme mencionado anteriormente, consideraram-se três cenários de simulação para a rede proposta. Dois destes considerando o diâmetro da tubulação uniforme e o terceiro considerando o diâmetro misto. Segue abaixo uma descrição mais específica dos cenários.

Cenário 1: Rede com tubulação constante de 4 polegadas de diâmetro externo.

Cenário 2: Rede com tubulação constante de 6 polegadas de diâmetro externo.

Cenário 3: Rede com tubulação mista, onde o caminho hidráulicamente mais desfavorável do cenário 1 é composto por uma tubulação de 6 polegadas e os demais tubos da rede de 4 polegadas de diâmetro externo.

Com base nos valores encontrados para os cenários propostos foi possível elaborar um quadro explicitando o custo aproximado de cada cenário.

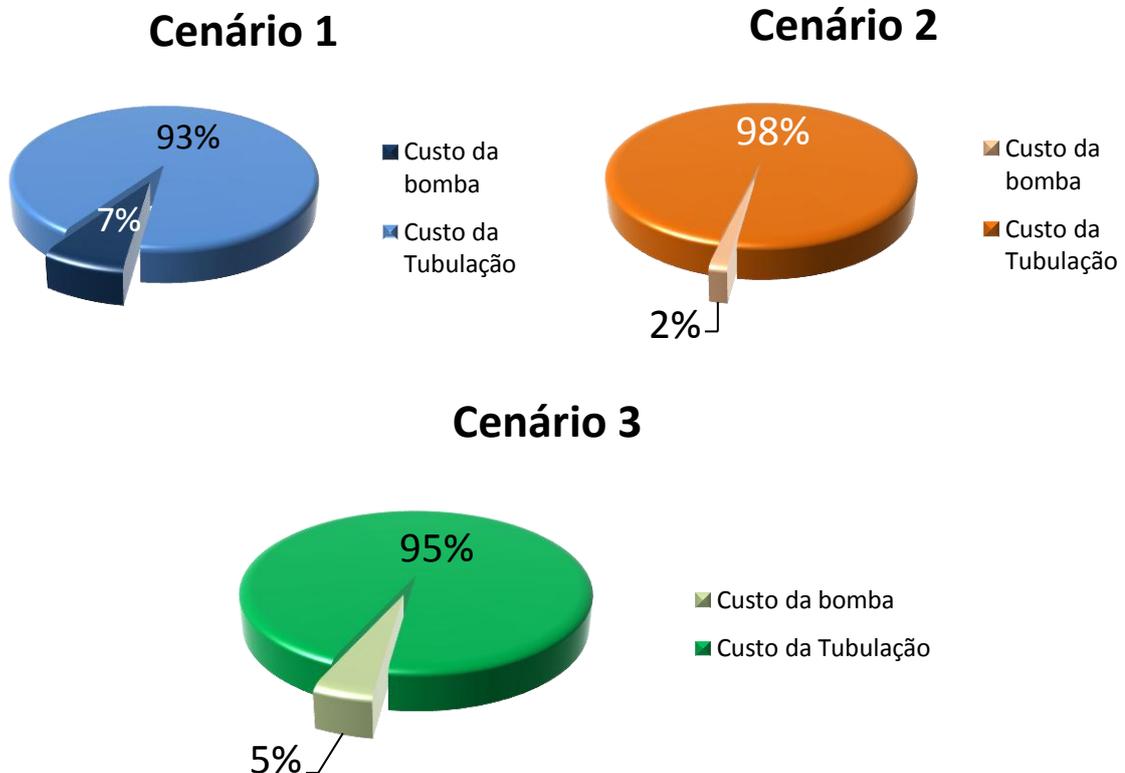
Tabela 7.2 Resultados dos cenários de simulação

	<b>CENÁRIO1:</b>	<b>CENÁRIO 2:</b>	<b>CENÁRIO 3:</b>
	<b>Tubulação 4"</b>	<b>Tubulação 6"</b>	<b>Tubulação 4 e 6"</b>
$H_{manométrica}$ (mca):	164,2637	43,4581	101,5451
Bomba requerida :	2 Bombas KSB Meganorm 80-400	1 Bomba KSB Meganorm 80-315	2 Bombas KSB Meganorm 80-315
Custo da bomba (\$):	17.156,00	6.234,50	12.469,00
Custo da tubulação (\$):	213.023,07	374.423,99	257.001,42
<b>Total</b>	<b>230.179,07</b>	<b>380.658,49</b>	<b>269.470,42</b>

Fonte: O autor

Com base nos dados da tabela acima, foram elaborados os gráficos abaixo visando mostrar a representatividade de cada elemento que compõe o custo total.

Figura 7.12 Gráficos da relação entre custo da bomba e o custo da tubulação para os cenários propostos

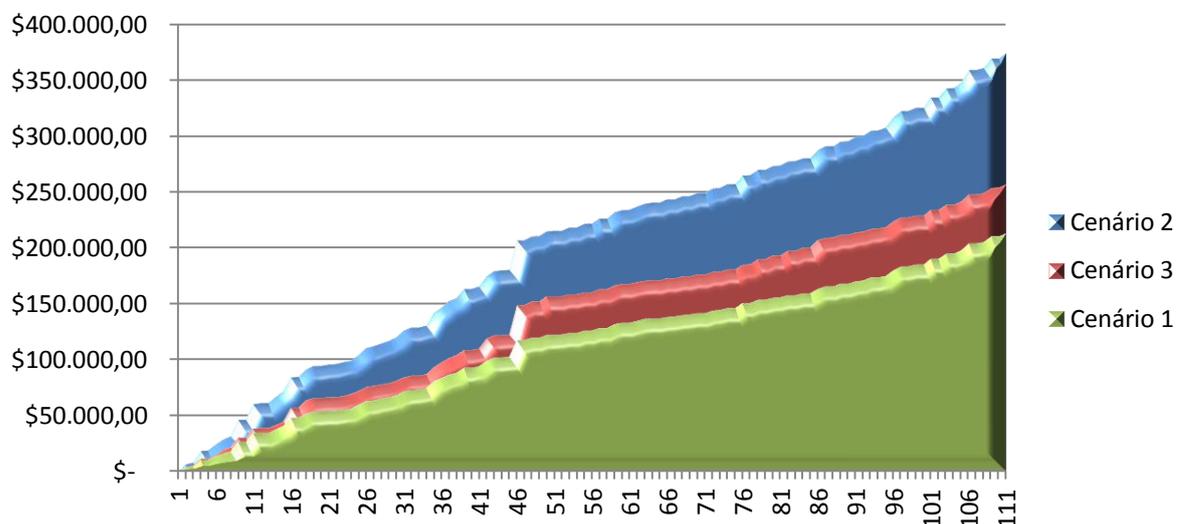


Fonte: O autor

Pode-se notar com clareza a superior representatividade que o custo da tubulação tem em detrimento do custo das bombas para todos os cenários observados. Neste caso a melhor escolha seria a rede com tubulações de menor diâmetro. No entanto esta é apenas uma análise econômica, não levando em consideração as desvantagens de trabalhar num regime de escoamento, com velocidades relativamente altas.

Visando obter uma visão mais clara dos custos relacionados às tubulações para cada cenário proposto foi elaborado o gráfico abaixo considerando os custos acumulados associados apenas às tubulações.

**Figura 7.13 Gráfico comparativo dos custos da tubulação dos cenários propostos**



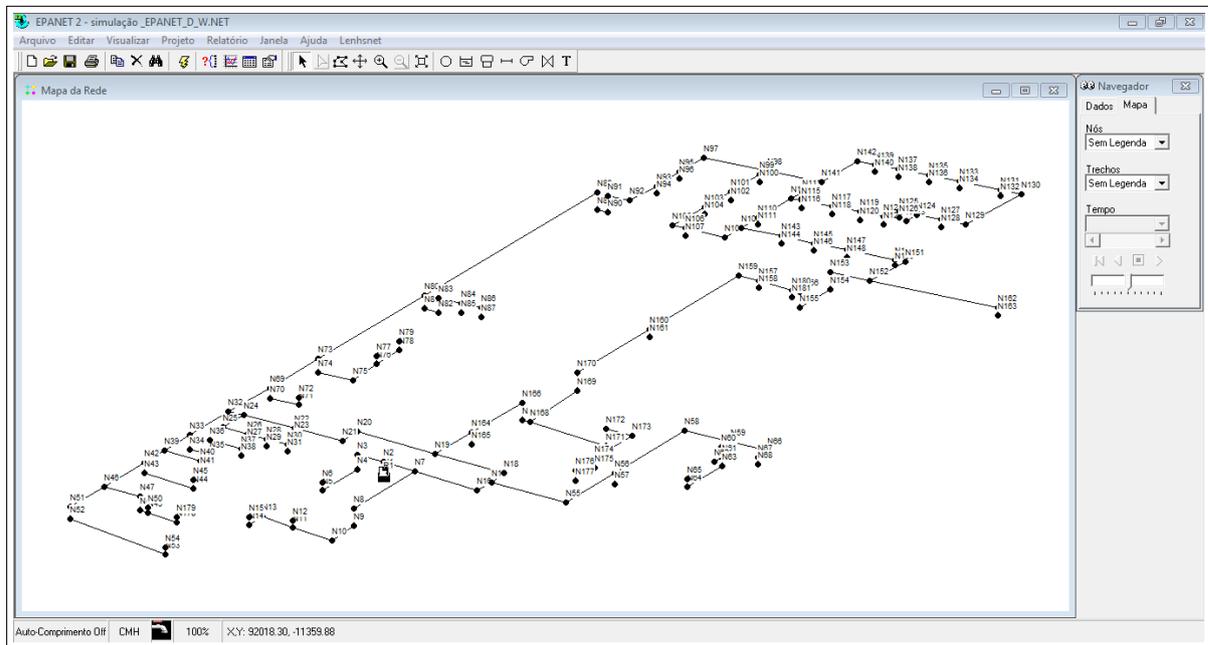
**Fonte: O autor**

Com base nos resultados obtidos ficou claro o impacto que o diâmetro das tubulações tem, tanto no custo quanto na perda de carga do sistema. Como sempre os objetivos técnicos e econômicos são conflitantes, tendo em vista que do ponto de vista técnico, o cenário que proporciona uma menor perda de carga seria, neste caso tecnicamente mais aceitável, adotar as tubulações de 6 polegadas. No entanto este é o cenário de maior custo associado devido ao custo da tubulação, o que representa maior parte do custo do sistema como um todo. O cenário 3 atende de forma aceitável tanto os requisitos técnicos quanto os econômicos, isto devido ao fato de tanto o custo quanto a perda de carga estarem próximos das melhores alternativas em cada aspecto considerado.

## 7.5 Simulação da rede do estudo de caso usando o EPANET 2.0

A rede hidráulica em estudo é composta por 53 pontos de consumo de água distribuídos numa rede com mais de 4.300 metros de tubulação. Visando uma maior coerência nos resultados, a equação para cálculo das perdas de carga consideradas nos dois métodos de análise foi a mesma (Darcy-Weisbach). Para tanto é necessária a conversão de unidades de algumas constantes incorporadas ao EPANET 2.0, isto porque ele utiliza a equação de Hazen-Williams como padrão para análise de redes hidráulicas. A figura 7.14 mostra a rede no ambiente do EPANET 2.0.

**Figura 7.14 Rede hidráulica do estudo de caso inserida no ambiente do EPANET 2.0**



**Fonte: O autor**

Neste estudo foi atribuído que o plano da tubulação enterrada é onde a cota geométrica é zero, deste modo as tubulações mais altas tem cota de 4 metros e a saída das válvulas estão a dois metros. Outra consideração que foi feita em relação aos nós, é que o consumo base considerado na validação foi zero, para todos os pontos, exceto para o hidráulicamente mais desfavorável encontrado na simulação do estudo de caso. Neste ponto específico foi atribuído um consumo de  $108 \text{ m}^3/\text{h}$ . Os trechos também possuem variáveis extremamente importantes para o funcionamento correto da simulação. Para os trechos deve-se inserir o comprimento em metros, o diâmetro em milímetros e o coeficiente do elemento de ligação para cálculo da perda de carga localizada. Uma observação importante é que conforme

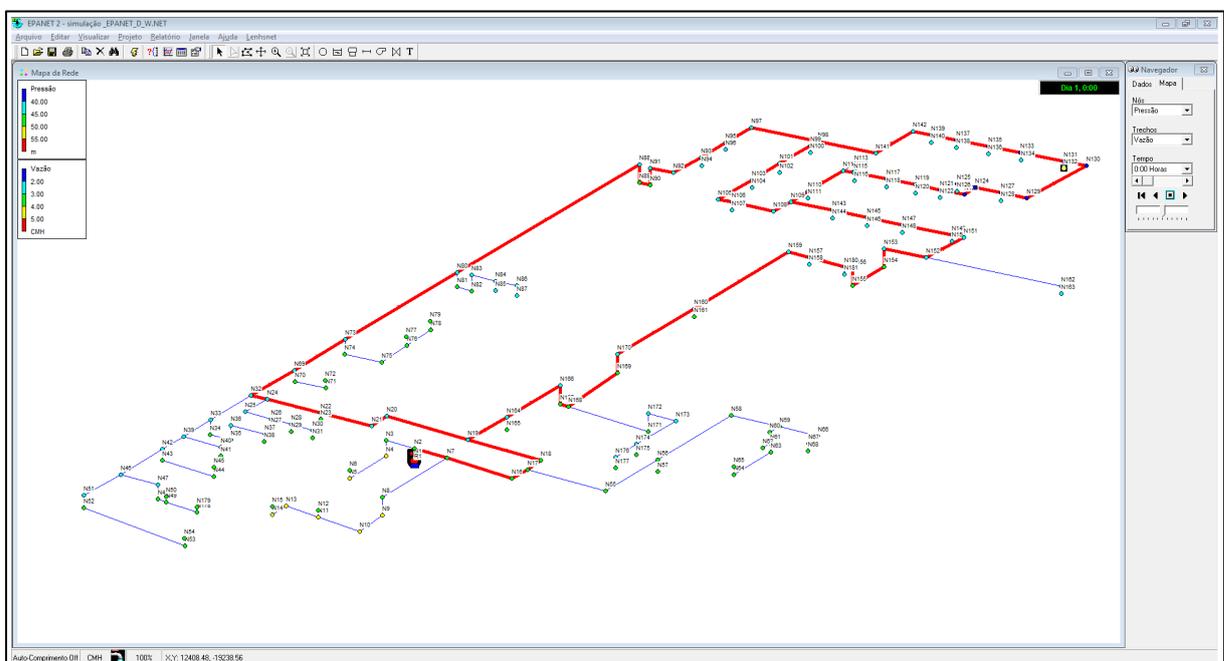
mencionado anteriormente, a equação utilizada para os cálculos das perdas de carga é a de Darcy-Weisbach. Deste modo a unidade de vazão deve ser alterada no EPANET 2.0 para CMH (cubic meters per hour), bem como o coeficiente de rugosidade do aço, o utilizado nas simulações foi 0,03 mm.

Foi inserido no modelo do EPANET 2.0 o seguinte conjunto de objetos:

- nós;
- trechos;
- reservatório de nível fixo e
- bomba

Os resultados mostrados a seguir correspondem aos encontrados na simulação estática considerando as tubulações de 6 polegadas (154 mm) de diâmetro. Vale salientar que o cenário desta simulação foi disponibilizado na íntegra no apêndice deste trabalho. A figura 7.15 apresenta a rede pressurizada e os caminhos em vermelho são os percursos por onde a água escoa para atingir o ponto de consumo hidráulicamente mais desfavorável.

**Figura 7.15** Caminhos possíveis para escoamento do fluido até o ponto hidráulicamente mais desfavorável



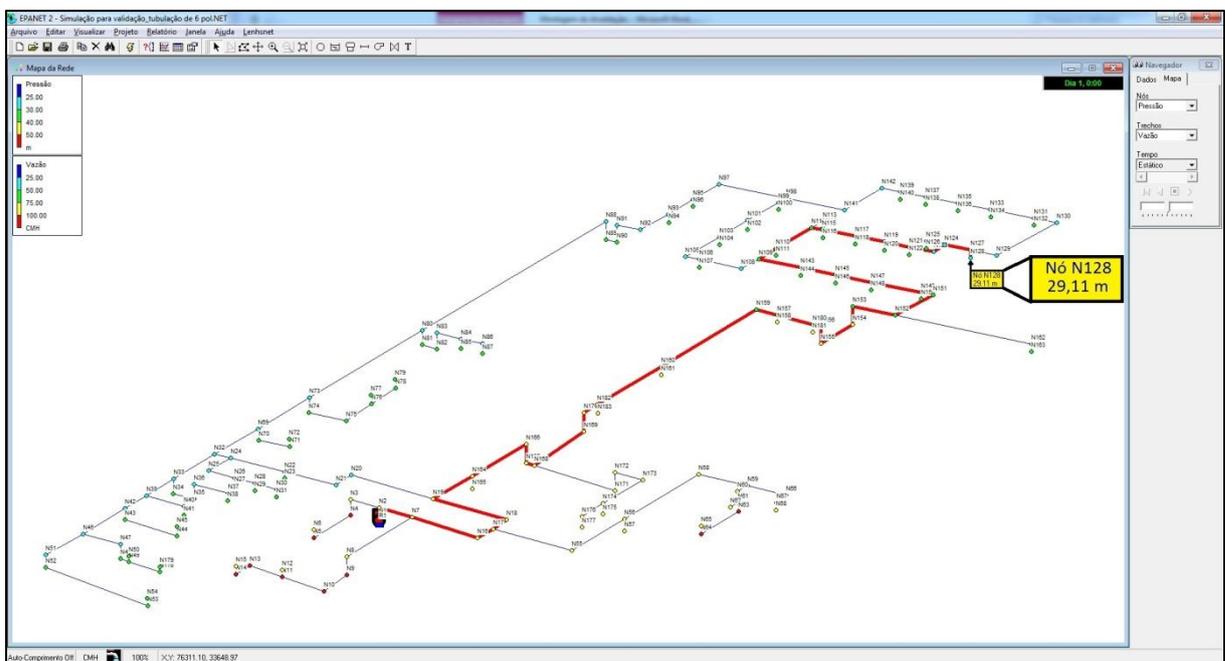
**Fonte:** O autor

É importante mencionar que a abordagem do algoritmo desenvolvido neste trabalho para solução de problemas de escoamento em redes está apenas no início, tendo em vista que os pesos do grafo foram definidos desconsiderando-se os efeitos

dinâmicos da redistribuição das vazões de acordo com as variações das perdas de carga, sendo estas, dependentes das vazões de cada trecho, o que implica num processo iterativo até que o equilíbrio da distribuição das vazões seja atingido. Deste modo a abordagem do algoritmo desenvolvido é conservadora no sentido de considerar o escoamento total da vazão por cada caminho analisado, o que na prática significaria dizer que os caminhos estariam pressurizados isoladamente, deste modo a perda de carga considerada é sempre maior do que a encontrada no sistema interligado.

A figura 7.16 apresenta o caminho encontrado no estudo de caso e o valor da pressão no ponto mais desfavorável.

**Figura 7.16 Caminho até o ponto hidráulicamente mais desfavorável encontrado pelo programa**



**Fonte: O autor**

Nesta simulação, conforme mencionado anteriormente, toda a vazão foi forçada a percorrer apenas pelo caminho mostrado na figura. Seguem abaixo os valores encontrados na simulação:

*Pressão de saída da bomba = 51 mca*

*Vazão = 108 m<sup>3</sup>/h*

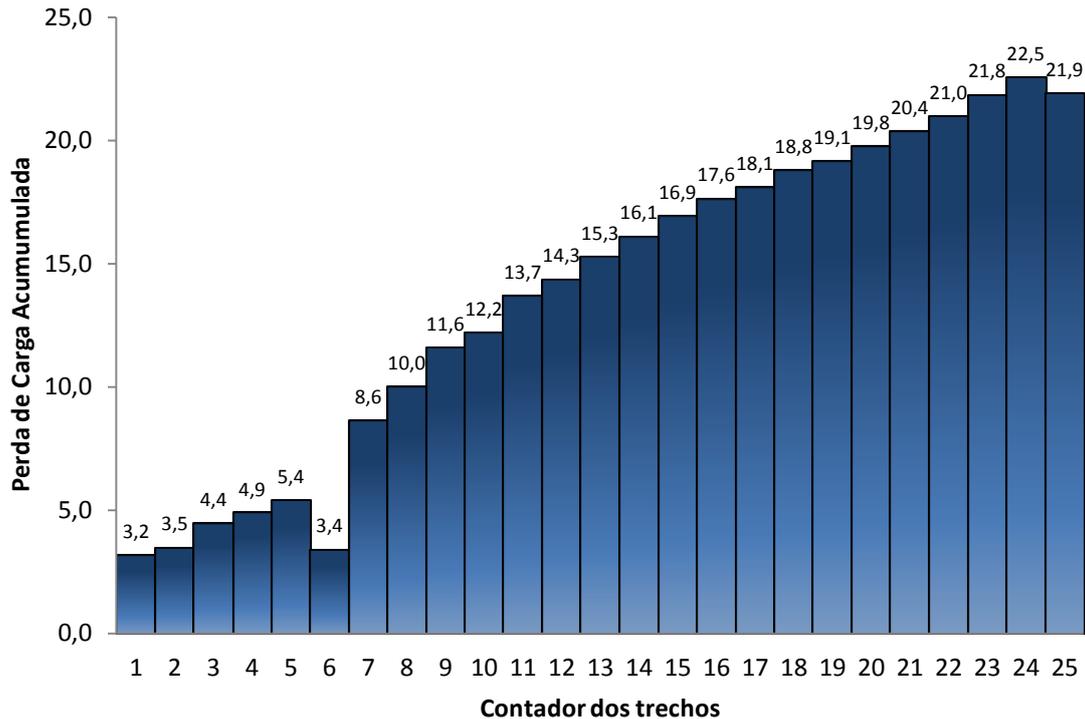
*Pressão no ponto (N128) = 29,11 mca*

*Perda de carga = Pressão de saída da bomba – Pressão no ponto (N128)*

$$\text{Perda de carga} = 51,00 - 29,11 = 21,89 \text{ mca}$$

O gráfico da figura 7.17 foi elaborado com os valores das perdas de carga de cada trecho que conduzem ao ponto mostrado no EPANET 2.0.

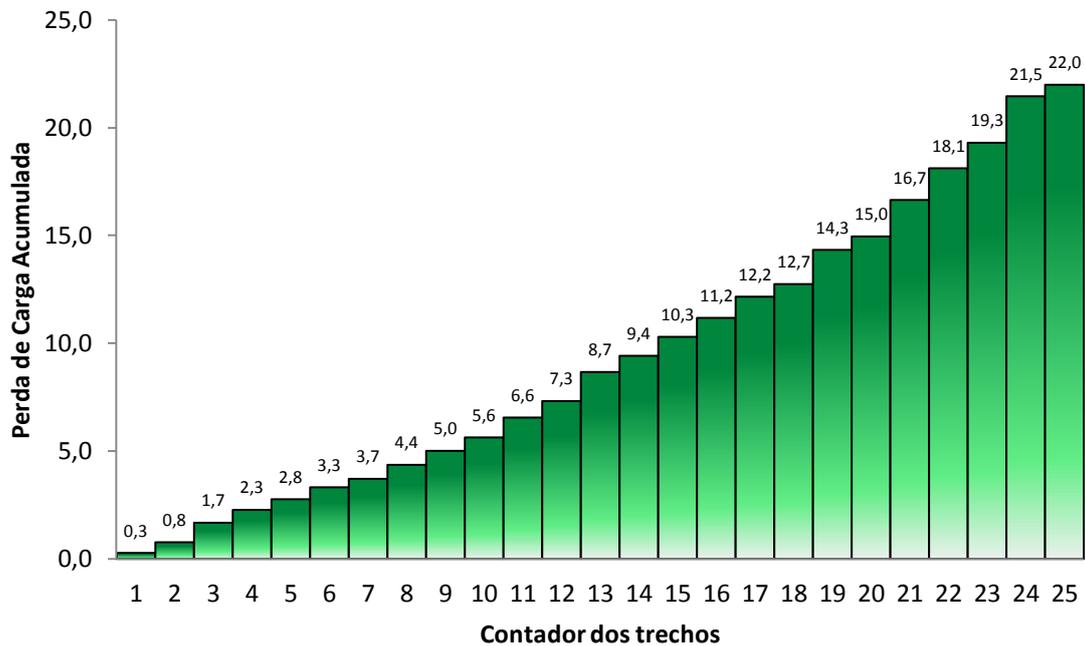
**Figura 7.17 Gráfico das perdas de carga acumuladas encontradas pelo EPANET 2.0**



Fonte: O autor

O gráfico da figura 7.18 mostra a perda de carga acumulada ao longo dos trechos que conduzem ao ponto analisado, de acordo com os dados fornecidos pela planilha usada para elaborar o grafo correspondente.

**Figura 7.18 Gráfico das perdas de carga acumulada encontrada pela planilha**

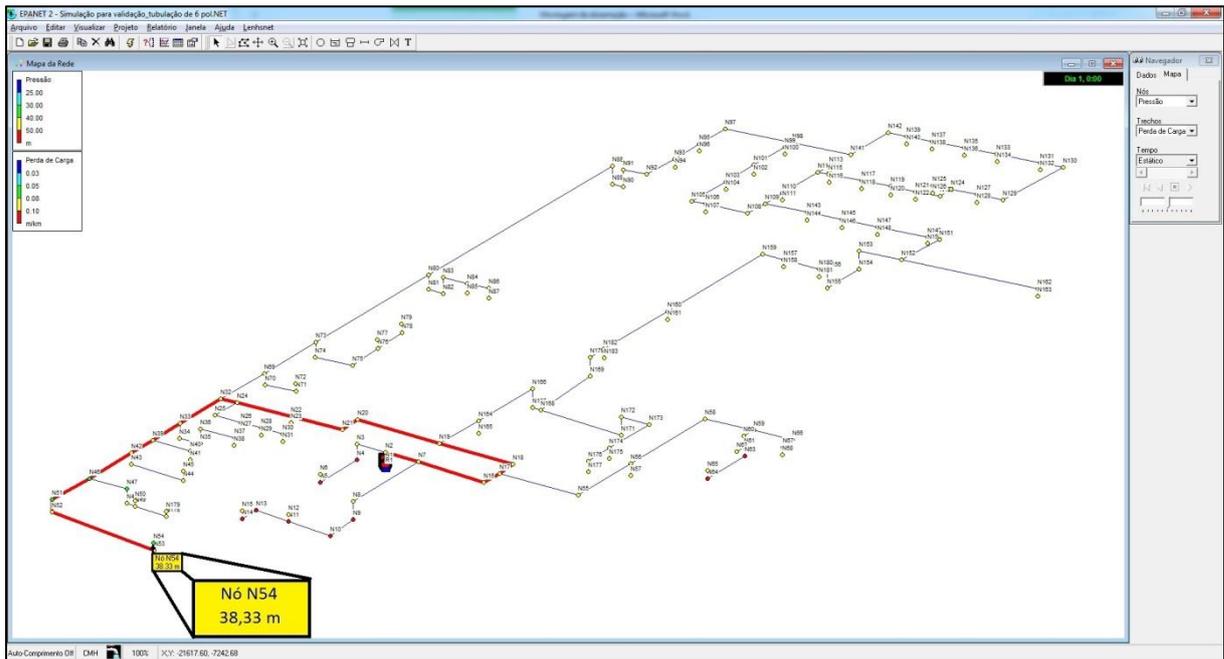


**Fonte: O autor**

Desta forma pôde-se constatar que os valores encontrados são satisfatórios, tendo em vista que a diferença, comparado ao resultado do EPANET 2.0, foi em torno de 0,5% levando em consideração as premissas citadas anteriormente.

A simulação a seguir mostra de forma clara o efeito da redistribuição das vazões de acordo com os valores das perdas de carga em cada caminho possível para escoamento do fluido. Conforme mostrado na figura existem três caminhos por onde a água pode escoar, no entanto é visível o caminho menos dispendioso para atingir o ponto em questão, deste modo a maior parte da vazão seja pelo caminho de menor resistência ao escoamento o que faz com que nestes casos os dois algoritmos cheguem a resultados muito próximos, sem que haja qualquer restrição à distribuição das vazões.

Figura 7.19 Caminho até o ponto N54



Fonte: O autor

Em termos numéricos a diferença dos resultados obtidos pelas duas formas de análise foram os seguintes:

— **Resultados do EPANET 2.0**

*Pressão de saída da bomba = 51 mca*

*Vazão = 108 m<sup>3</sup>/h*

*Pressão no ponto (N54) = 38,67 mca*

*Perda de carga = Pressão de saída da bomba – Pressão no ponto (N54)*

*Perda de carga = 51,00 – 38,33 = 12,67 mca*

— **Resultado obtido pelo grafo**

*Vazão = 108 m<sup>3</sup>/h*

*Perda de carga = 12,66 mca*

## 7.6 Análise dos resultados

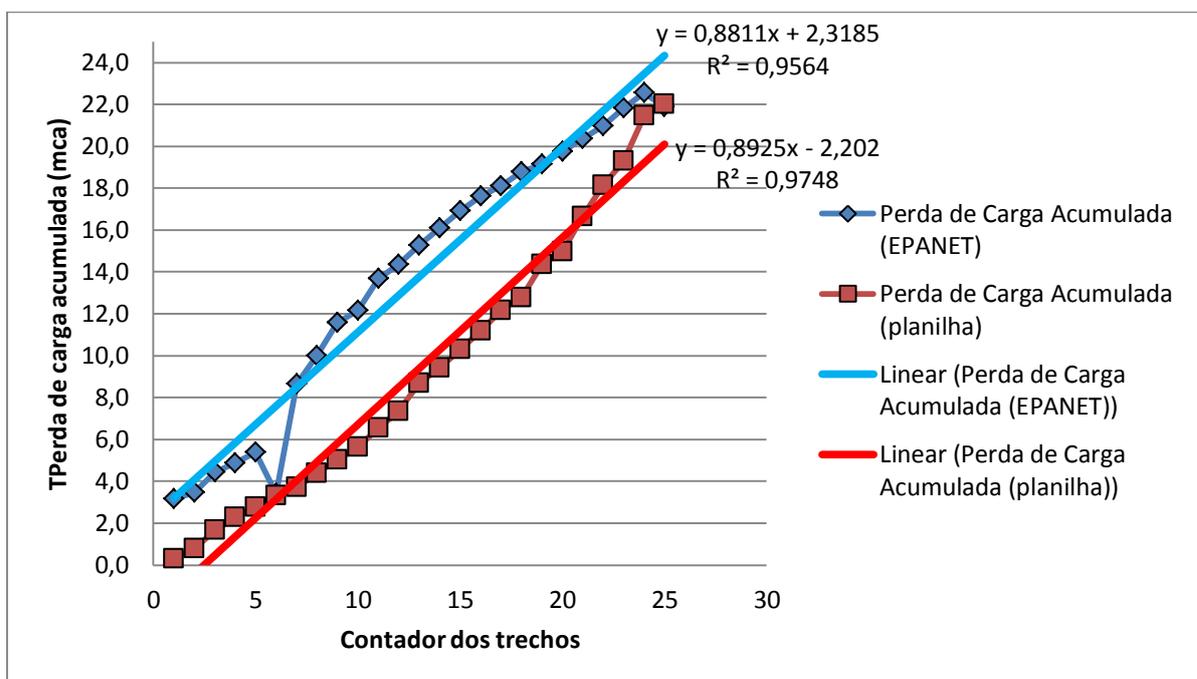
Com os resultados desta simulação, o erro obtido foi de aproximadamente 0,01%. De um modo geral os resultados verificados nas simulações validam o modelo proposto, isto devido à compatibilidade nos resultados encontrados das duas formas

mostradas. É importante notar que a proposta da abordagem via teoria dos grafos para estas simulações, por hora ainda não serão utilizadas como a única ferramenta para dimensionar a rede hidráulica, esta é uma ferramenta eficiente para fornecer boas aproximações no sentido de direcionar a escolha de um determinado cenário em detrimento de outros de forma rápida e conservadora, fornecendo assim uma base para análises e dimensionamentos mais acurados e precisos a cerca do que se espera do sistema.

Já era de se esperar o alto impacto do custo das tubulações no custo total do projeto. No entanto, com as análises realizadas pôde-se perceber o quão representativas estas são, bem como as rotas que proporcionam uma maior dissipação da energia fornecida para o escoamento do fluido.

Em relação aos métodos aplicados para a resolução do estudo de caso pôde-se observar que os resultados convergiram para o mesmo valor e o erro associado foi satisfatório o que serviu para validar a metodologia proposta. Pode-se observar no gráfico 7.20 que as linhas de tendência das duas dispersões são quase paralelas entre si espaçadas aproximadamente da diferença de nível das tubulações elevadas e enterradas.

**Figura 7.20** Dispersão dos dados da perda de carga acumulada



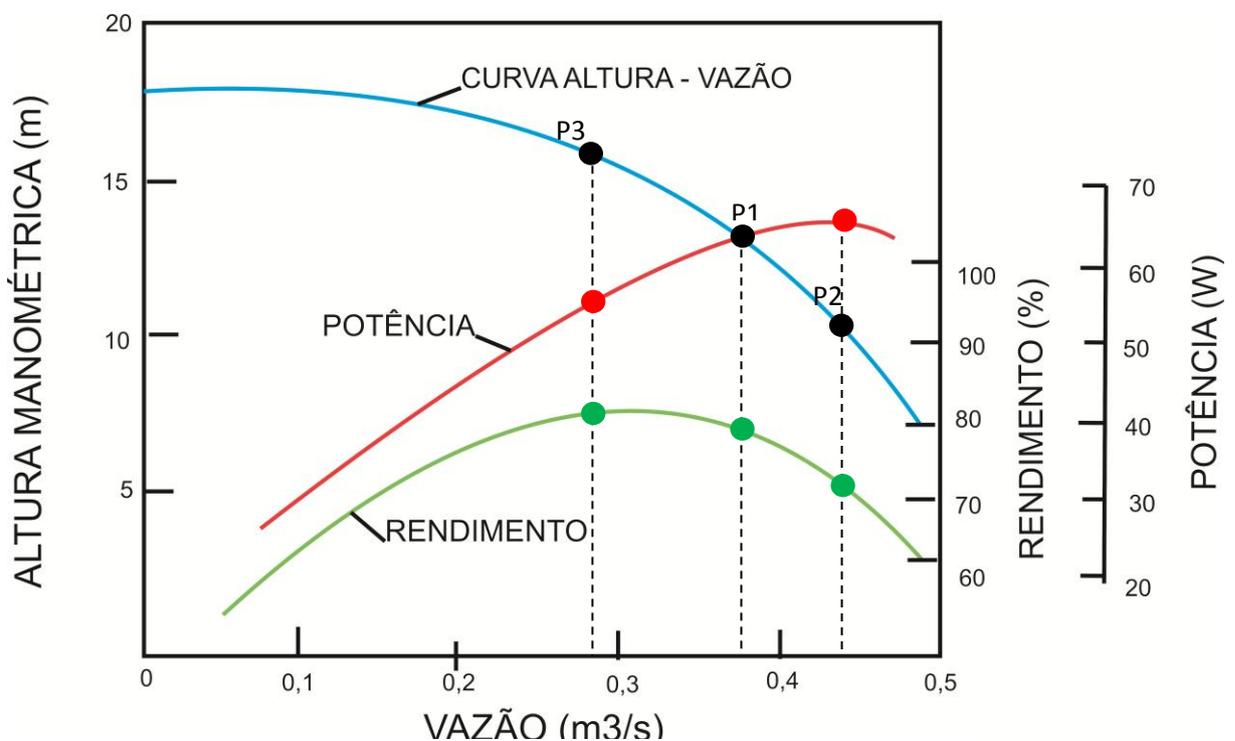
Fonte: O autor

O ponto afastado da curva de perda de carga acumulada do EPANET teve uma acentuada queda no início pelo fato do escoamento ter sido ajudado pela ação da gravidade o que fez com que a perda de carga fosse negativa neste ponto. De um modo geral as curvas são explicadas pelas retas de tendência em mais de 95% dos pontos.

Para instalações onde equipamentos serão parte integrante da rede, estes devem ser inseridos na simulação com sua perda de carga associada à aresta (trecho) ao qual pertence.

Vale apenas salientar que do ponto de vista energético e de custo de operação, a abordagem proposta neste trabalho traz consigo uma mudança de paradigma no dimensionamento de redes hidráulicas industriais, tendo em vista que o dimensionamento é usualmente feito com base no caminho crítico para um determinado ponto crítico. Efetuando uma análise mais detalhada no impacto desta mudança de paradigma pode-se afirmar com base na figura 7.21 que:

**Figura 7.21 Curva característica de uma bomba centrífuga**



Fonte: Adaptado de Albanzeze 2012.

Conforme o ponto de operação caminha na curva (altura – vazão) para o ponto P2 do gráfico, isto significa um incremento na potência consumida da bomba o que

pode levar a um superaquecimento e uma queda no rendimento. Deste modo pode-se notar intuitivamente que para que o ponto de operação se desloque na curva para o ponto P2 é necessário que a perda de carga na operação seja inferior ao previsto em projeto. Sendo assim, há uma maior possibilidade na ocorrência deste tipo de problema para sistemas onde a perda de carga foi dimensionada considerando-se um caminho crítico. Para os casos onde a perda de carga na operação é superior ao previsto em projeto, nota-se que a tendência do ponto de operação se deslocar para o ponto P3 da curva, impactando na perda de vazão e uma possível queda no rendimento. No entanto, a potência consumida da bomba tende a cair eliminando a possibilidade de parada por superaquecimento.

A medida usualmente tomada nos casos onde o ponto de operação caminha na curva para o ponto P2 (direita), é a restrição do fluxo por meio de acessórios instalados na linha. Apesar de resolver o problema do superaquecimento e “pseudoresolver” o problema da queda do rendimento, a restrição do fluxo induz na verdade um aumento na perda de carga, o que do ponto de vista energético representa um desperdício de energia ao longo da operação do sistema.

## 8 Conclusões

Conforme observado no trabalho os resultados mostraram que o objetivo geral do mesmo foi atingido. Tendo em vista que os cenários foram simulados de forma rápida e os resultados obtidos foram satisfatórios. Os cenários simulados deixaram clara a relação entre os custos da tubulação e das bombas, bem como os caminhos preferenciais para o escoamento até o ponto hidráulicamente mais desfavorável. O que dá ao projetista uma noção mais realista e conservadora de cada cenário. Contudo pode-se constatar que por meio da metodologia proposta as análises iniciais de sistemas hidráulicos industriais se tornaram mais confiáveis. Todavia ainda perde-se um pouco de tempo para a elaboração do cenário inicial, assim como nos demais programas que se destinam a resolver a mesma classe de problema, o que ocorre devido à falta de integração entre os programas envolvidos. No entanto de posse do cenário inicial os cenários subsequentes puderam ser elaborados em poucos minutos.

O programa foi escrito em linguagem MATLAB<sup>®</sup> com 40 linhas de comando, responsáveis por conferir uma interface amigável para facilitar a modelagem do problema. As vantagens que a metodologia proposta têm em relação ao EPANET são:

- Facilidade para manipulação dos dados;
- Interface objetiva;
- Maior facilidade para alterar os cenários;
- Fornece de forma clara e direta o ponto hidráulicamente mais desfavorável;
- Não necessita de informações sobre o reservatório e bomba;
- A metodologia pode ser facilmente adaptada para resolver outros tipos de problemas (versátil).

Com essas características o programa se mostrou uma ferramenta muito útil para facilitar às tomadas de decisão acerca do melhor cenário sob a ótica dos objetivos econômicos e técnicos.

## 8.1 Proposta para trabalhos futuros

Em trabalhos futuros pode-se buscar a validação de modelos deste tipo por meio da utilização de medidores de pressão e de fluxo em diversos pontos de uma rede real. Dando ao modelo uma confiabilidade ainda maior. Outra proposta seria a modelagem de uma rede com equipamentos ligados em série e analisar a perda de carga localizada promovida por cada equipamento da rede. A próxima etapa deste trabalho será a elaboração de um aplicativo capaz de importar arquivos gerados por programas do tipo CAD e realizar automaticamente a análise dos mesmos, de modo que todas as entradas necessárias para esta análise já estejam especificadas no arquivo importado, fazendo com que a barreira da elaboração do primeiro cenário seja vencida. Espera-se também que as análises levem em consideração a redistribuição das vazões e pressões bem como a possibilidade de análise e otimização da eficiência energética do sistema.

## Referências

ALBANEZE, D. B. Análise do consumo de energia elétrica com a instalação de um inversor de frequência no sistema de abastecimento de água do bairro aero rancho em campo grande – MS. 2012. 72 p. Monografia (Graduação em engenharia elétrica) – Centro de ciências exatas e tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13714: Sistemas de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio. Rio de Janeiro, 2000.

BERTSEKAS, D. P. Network optimization: Continuous and Discrete Models. Massachusetts: Athena Scientific, 1998. 356 p.

BOUZNIF, M.; MONCEL, J.; PREISSMANN, M., Generic algorithms for some decision problems on fasciagraphs and rotagraphs, Discrete Mathematics, V 312, Issue 17, p. 2707-2719, 2012.

CREDER, H. Instalações hidráulicas e sanitárias. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 423 p.

DIESTEL, Reinhard. Electronic edition Graph Theory. 3 ed. Nova York, Berlin: Springer, 2005.

FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H. Modelos de análise hidráulica de redes de distribuição de água considerando demanda dirigida pela pressão e vazamentos. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental (RESA). v 13; nº 2; p.153-162, 2008.

FOX, Robert W., Introdução à Mecânica dos Fluidos / Tradução da 6ª ed. americana, Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2006.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. Otimização combinatória e programação linear. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 518 p.

GUDWIN, R. R.; GUERRERO, J. A. S.; SUÁREZ, L. L. Análise da Importância de Parâmetros em um Algoritmo Genético por meio de sua Aplicação no aprendizado de uma rede neural , anais do XIX Congresso da SBC. II ENIA, 1999.

HARARY, Frank, Graph Theory, Addison–Wesley, Reading, MA, 1969.

JUN, L.; GUOPING, Y. Iterative Methodology of Pressure-Dependent Demand Based on EPANET for Pressure-Deficient Water Distribution Analysis. J. Water Resour. Plann. Manage, 139(1), p. 34–44, 2013.

KUREK, W.; OSTFELD, A. Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems, Journal of Environmental Management, v115, p. 189-197, 2013.

LENCASTRE, A. Hidráulica Geral, Editora Luso-Brasileira, 654 p. 1983.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. Correction of the EPANET Inaccuracy in Computing the Efficiency of Variable Speed Pumps. J. Water Resour. Plann. Manage., 139(4), p. 456–459, 2013.

PACHECO, M. A. C. Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações. Disponível em <http://www.ica.ele.puc-rio.br/Downloads/38/CE-Apostila-Comp-Evol.pdf>. Acessado em 25 de abril de 2013.

PICADO, J. Estruturas Discretas: Textos de Apoio. Universidade de Coimbra, 2010.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. 2. ed., Editora da Universidade - EESC/USP. 1999.

ROSAL, M. C. F. Programação não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água. 2007. 117p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ROSSMAN; L. A. EPANET User's Manual. National risk management research laboratory, office of research and development, USEPA, EPA Publication. EPA/600/R- 00/057, September. 200p. 2000.

SHAMIR , U.; HOWARD , C. D. D. Water Distribution Systems Analysis. Journal of Hydraulics Division, ASCE, v.94, n.1, p.219 - 234. 1968.

TEBCHARANI, G. J. Projeto Ótimo de redes de distribuição de água via algoritmos genéticos multiobjetivos. Campo Grande, 2007. 117 p. Dissertação (Mestrado). – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil, 2007.

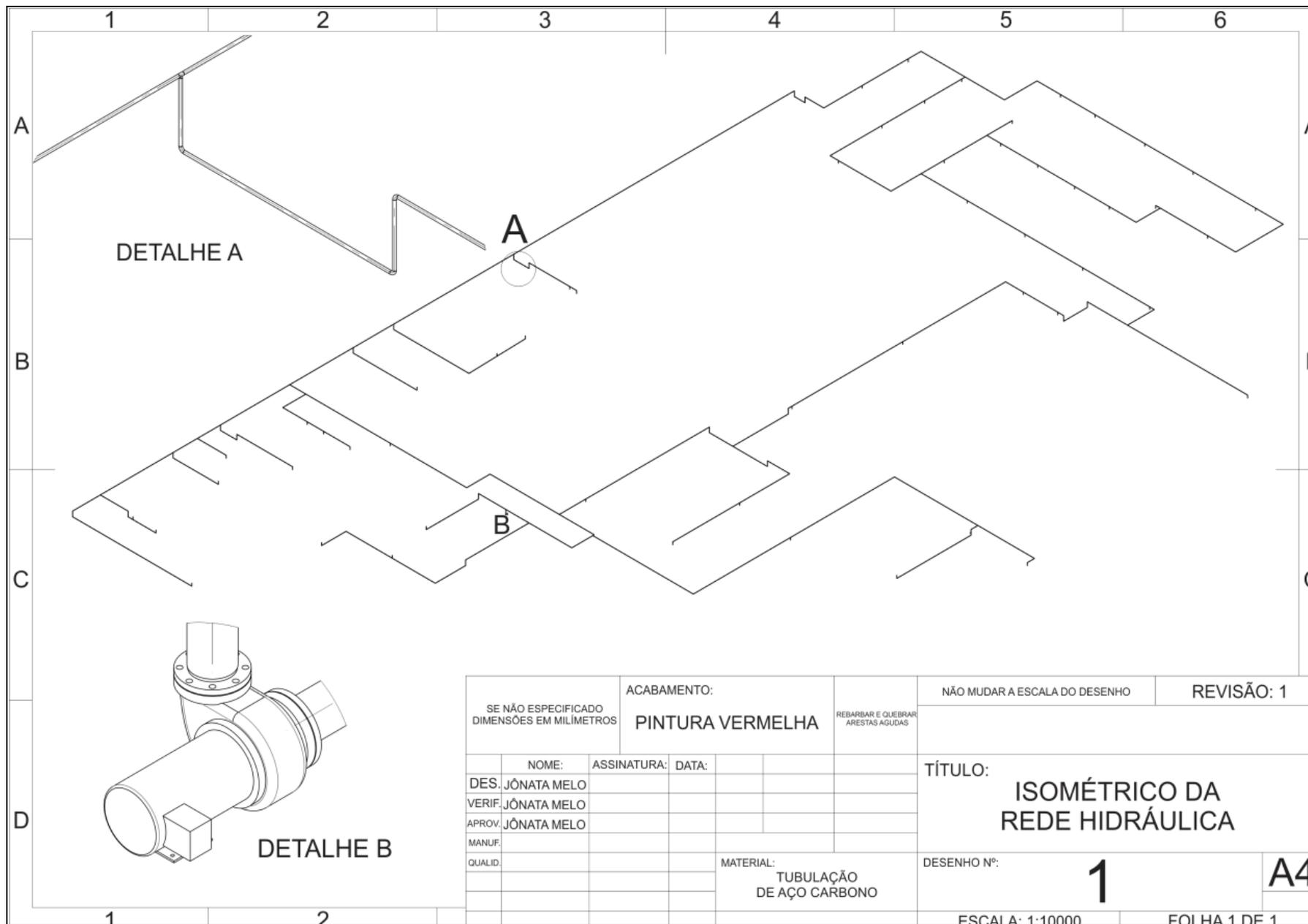
TODINI , E.; PILATI , S. A Gradient Algorithm for ht Analysis of Pipe Networks. In: (Ed.) International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution:Leicester Polytechnic, p.1-20, 1987.

WHITE, Frank M. Mecânica dos fluidos. 6 ed. Rio de janeiro: McGraw-Hill, 2011.

## Apêndices

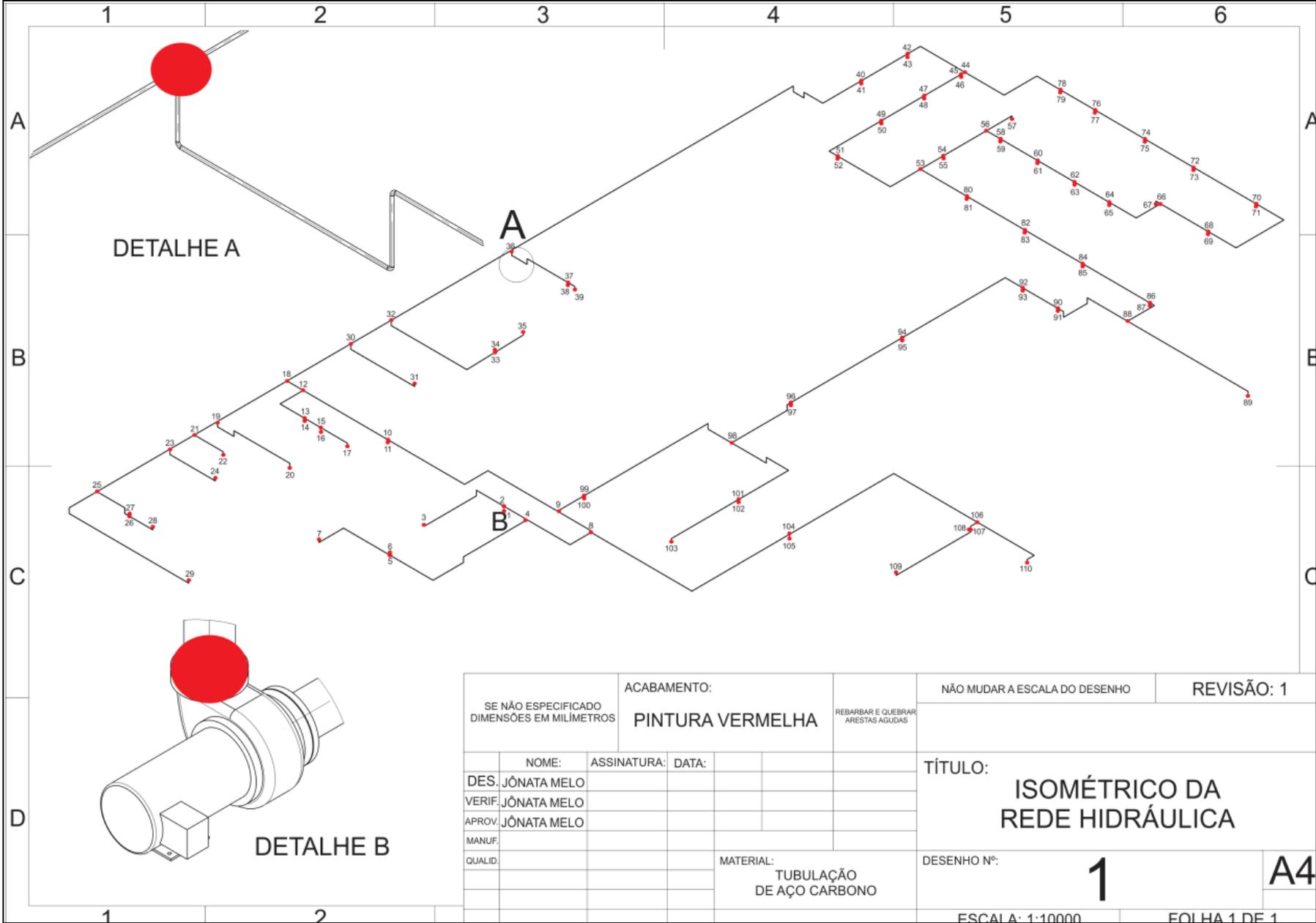
### APÊNDICE A: FIGURAS

A1: Figura 7.1 Rede hidráulica do estudo de caso



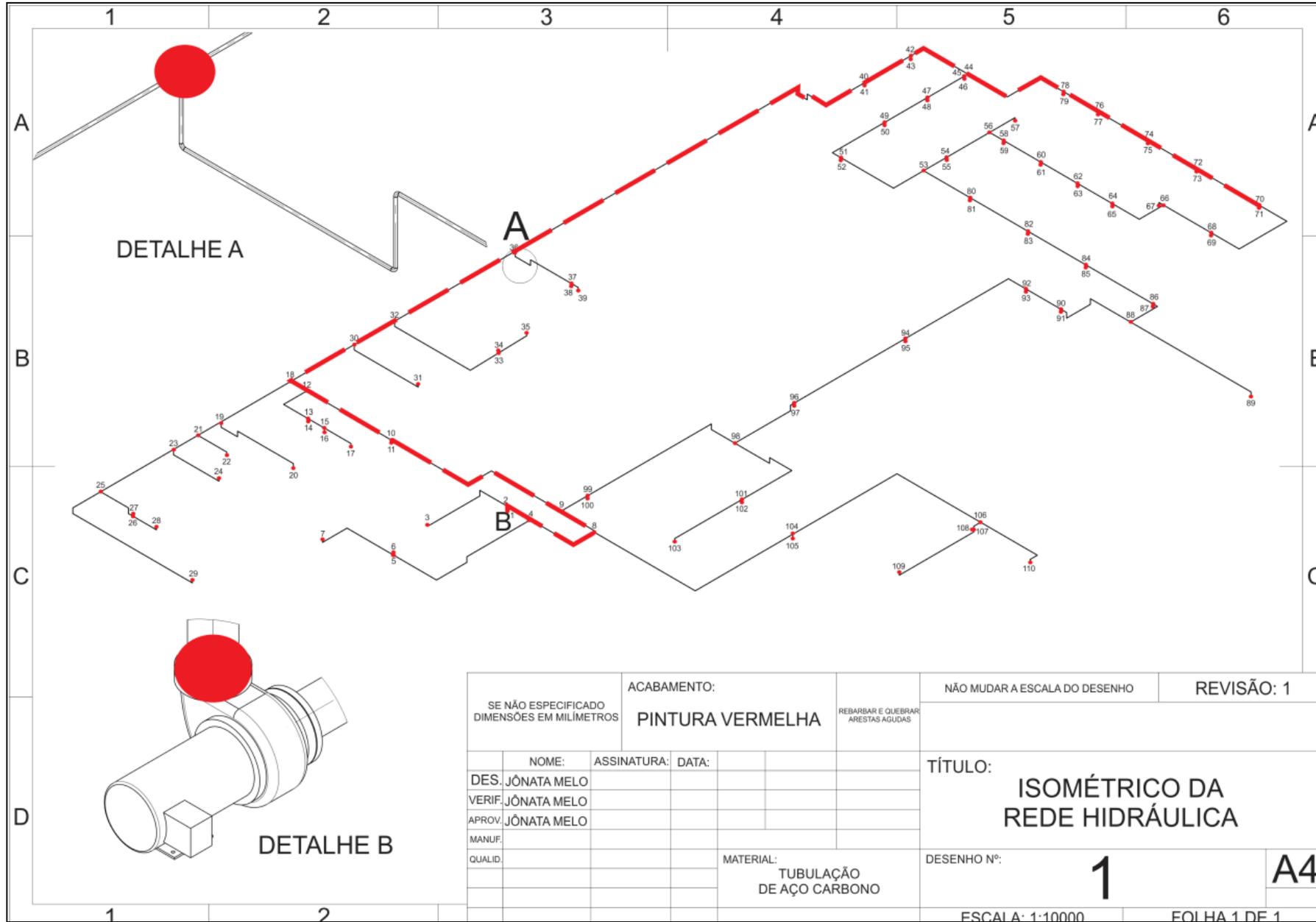
SE NÃO ESPECIFICADO DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO: <b>PINTURA VERMELHA</b>		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO: 1	
NOME:		ASSINATURA:		DATA:		TÍTULO: <b>ISOMÉTRICO DA REDE HIDRÁULICA</b>			
DES.	JÔNATA MELO					DESENHO Nº: <b>1</b>		<b>A4</b>	
VERIF.	JÔNATA MELO					ESCALA: 1:10000		FOLHA 1 DE 1	
APROV.	JÔNATA MELO					MATERIAL: TUBULAÇÃO DE AÇO CARBONO			
MANUF.									
QUALID.									

A2: Figura 7.3 Rede hidráulica do estudo de caso com pontos marcados



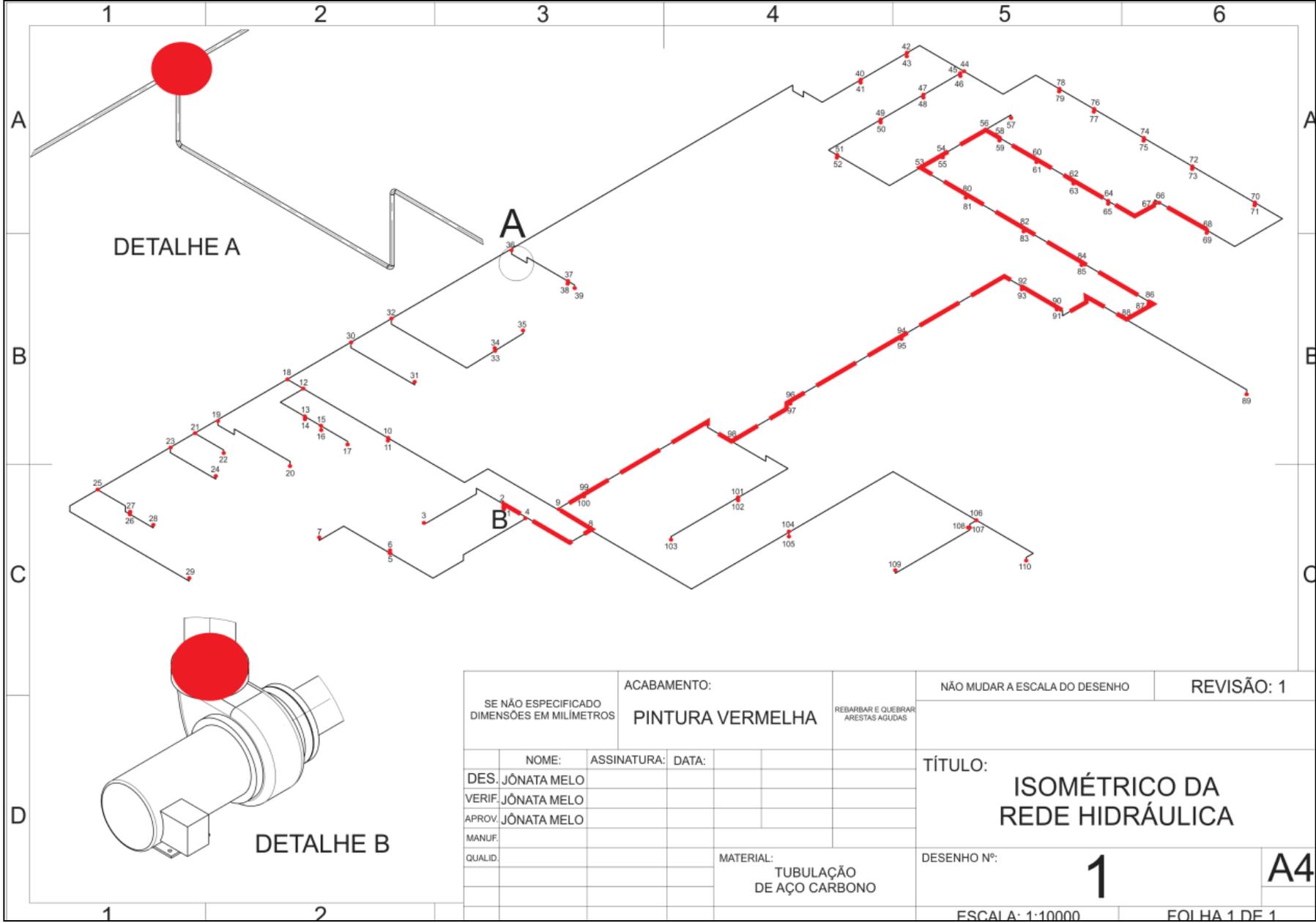
SE NÃO ESPECIFICADO DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO: <b>PINTURA VERMELHA</b>		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO: 1	
				REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS			
	NOME:	ASSINATURA:	DATA:				
DES.	JÔNATA MELO			TÍTULO: <b>ISOMÉTRICO DA REDE HIDRÁULICA</b>			
VERIF.	JÔNATA MELO						
APROV.	JÔNATA MELO						
MANUF.							
QUALID.				MATERIAL: TUBULAÇÃO DE AÇO CARBONO		DESENHO Nº: <b>1</b>	
				ESCALA: 1:10000		FOLHA 1 DE 1	
						<b>A4</b>	

A3: Figura 7.6 Rede hidráulica com caminho hidráulicamente mais desfavorável em destaque



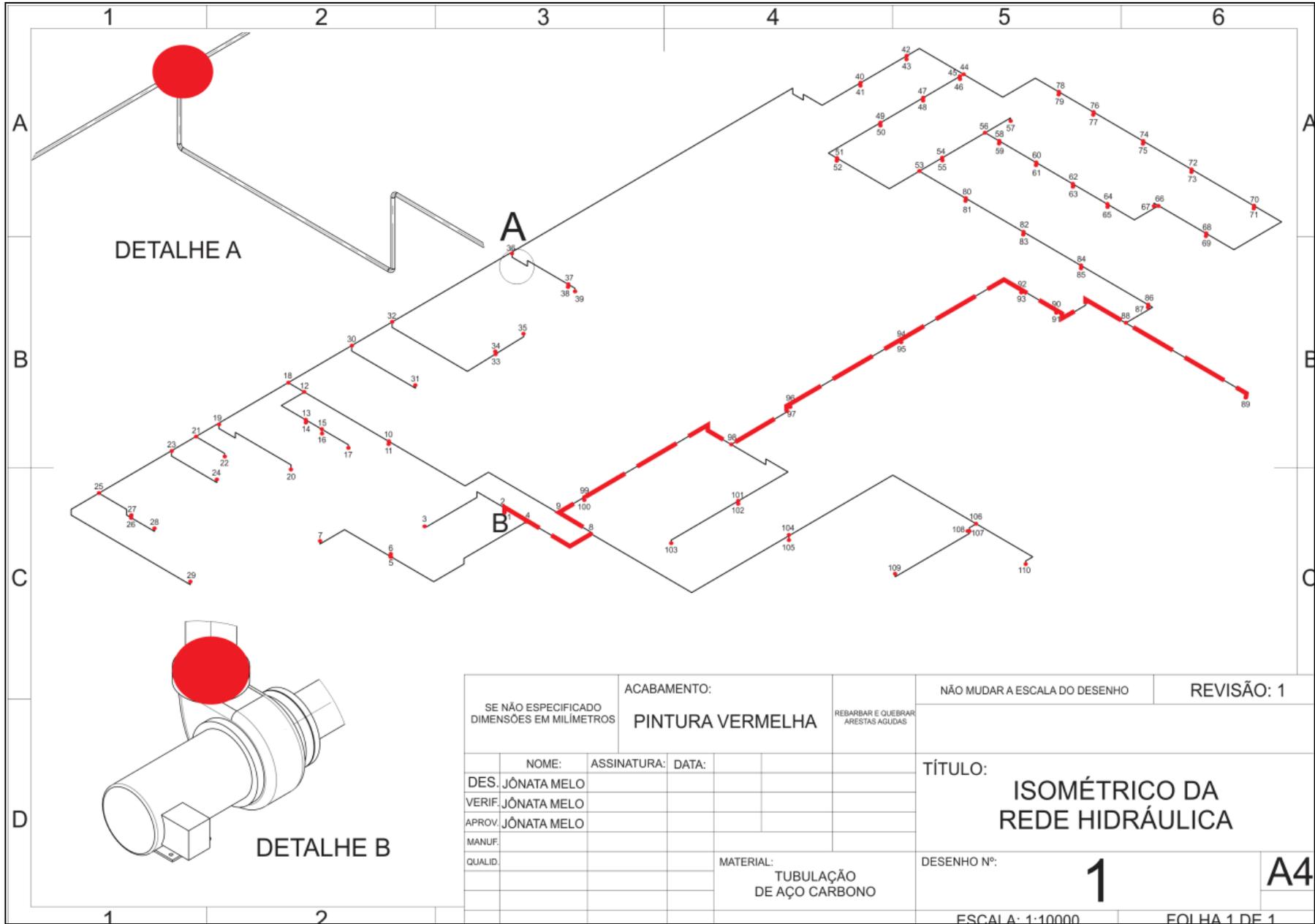
SE NÃO ESPECIFICADO DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO: <b>PINTURA VERMELHA</b>		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO: 1
NOME:	ASSINATURA:	DATA:			TÍTULO: <b>ISOMÉTRICO DA REDE HIDRÁULICA</b>	
DES. JÔNATA MELO						
VERIF. JÔNATA MELO						
APROV. JÔNATA MELO						
MANUF.						
QUALID.				MATERIAL: TUBULAÇÃO DE AÇO CARBONO	DESENHO N°: <b>1</b>	<b>A4</b>
					ESCALA: 1:10000	FOLHA 1 DE 1

A4: Figura 7.8 Rede hidráulica com caminho hidráulicamente mais desfavorável tubulação de 6 polegadas

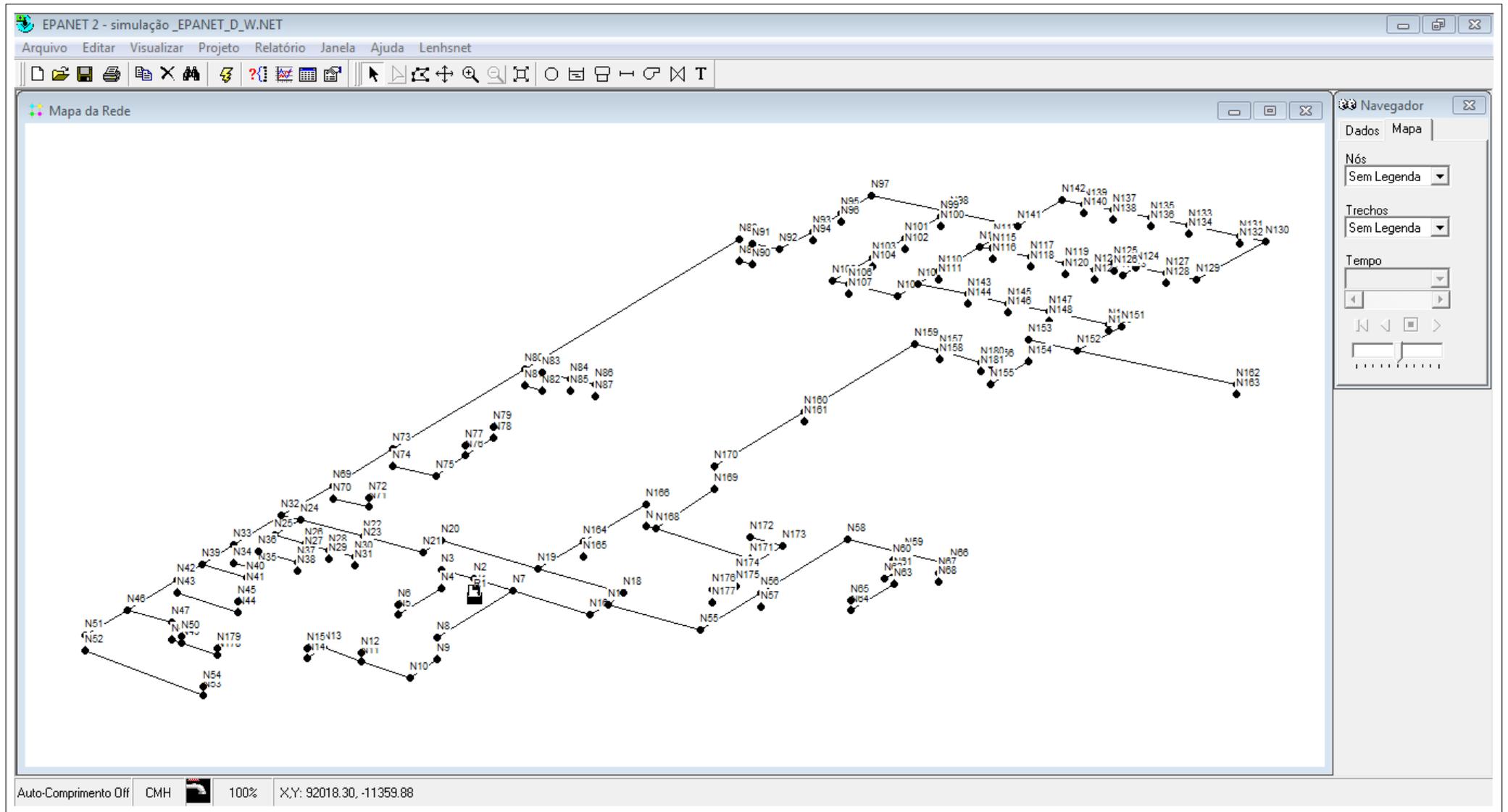


SE NÃO ESPECIFICADO DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO: <b>PINTURA VERMELHA</b>		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO: 1
NOME:	ASSINATURA:	DATA:			TÍTULO: <b>ISOMÉTRICO DA REDE HIDRÁULICA</b>	<b>1</b>
DES. JÔNATA MELO						
VERIF. JÔNATA MELO						
APROV. JÔNATA MELO						
MANUF.					DESENHO Nº:	<b>A4</b>
QUALID.				MATERIAL: TUBULAÇÃO DE AÇO CARBONO		
					ESCALA: 1:10000	FOLHA 1 DE 1

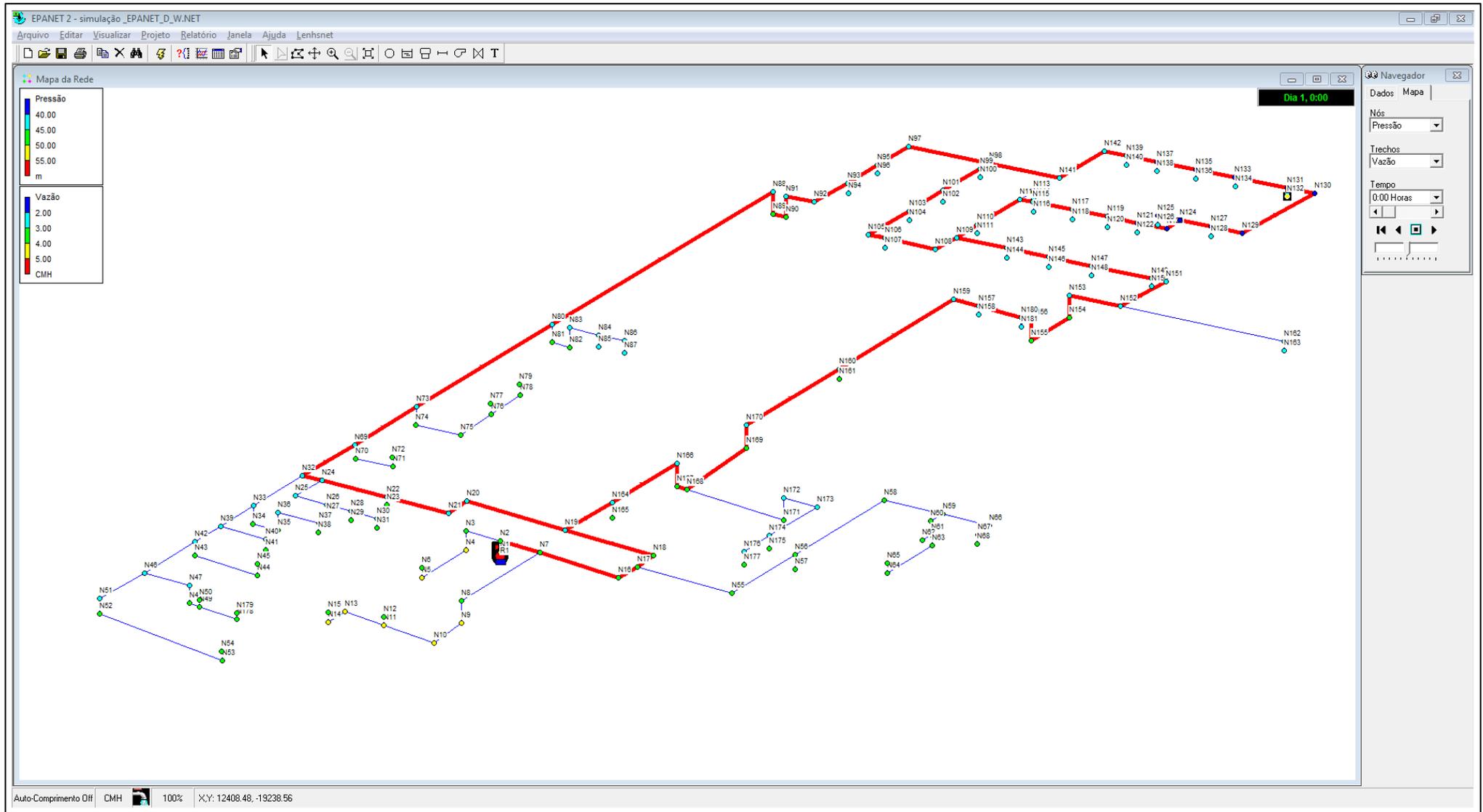
A5: Figura 7.8 Rede hidráulica com caminho hidráulicamente mais desfavorável tubulação com diâmetro misto

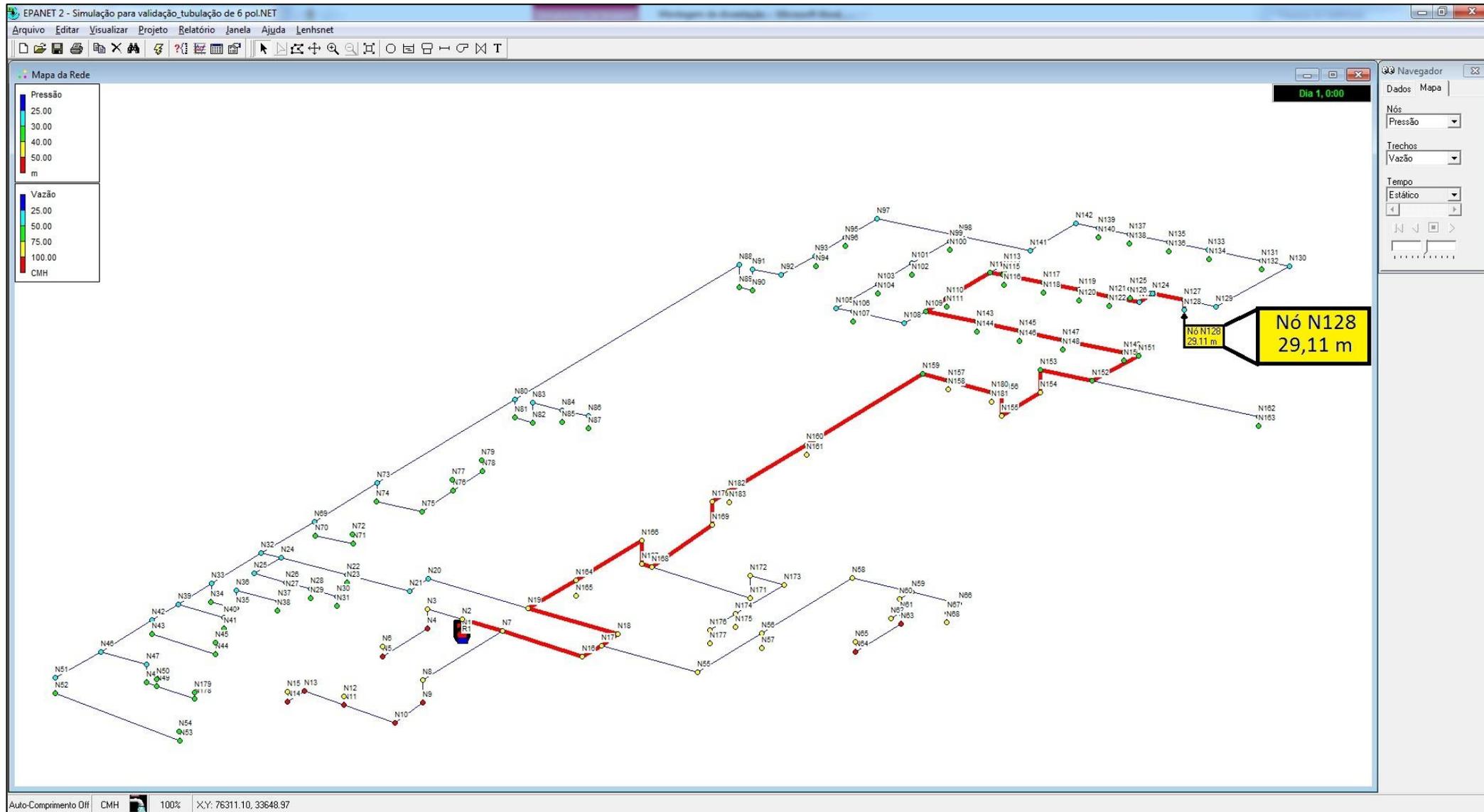


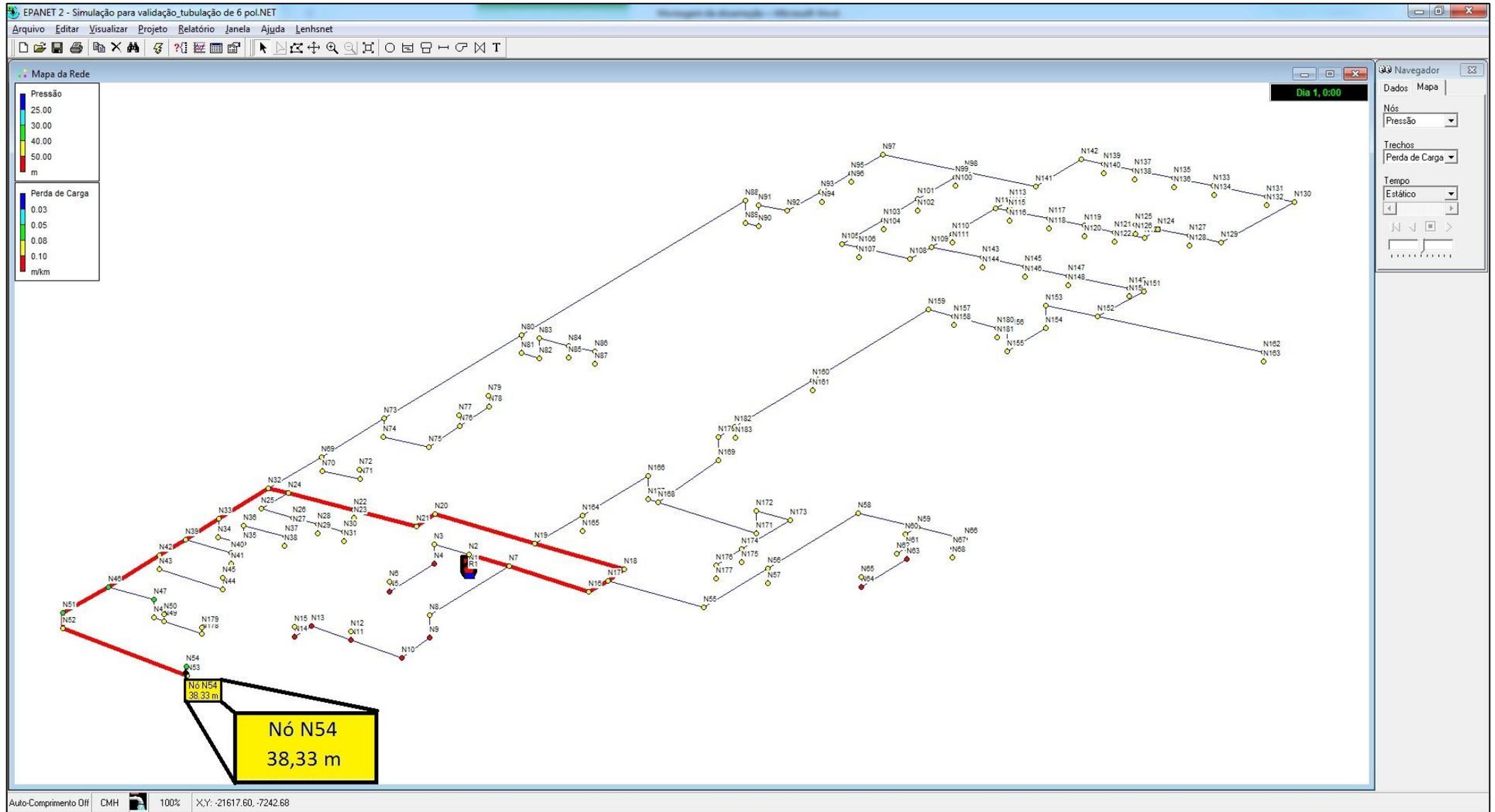
A6: Figura 7.14 Rede hidráulica do estudo de caso inserida no ambiente EPANET 2.0



A7: Figura 7.15 Caminhos possíveis para escoamento do fluido até o ponto hidráulicamente mais desfavorável







## APÊNDICE B: Cenários de simulação do EPANET 2.0

### B1: Relatório completo da simulação da validação do EPANET 2.0

Página 1

28/06/2013 14:26:48

```

*****
*                EPANET 2.0 Brasil                *
*                Hidráulica e Qualidade da Água    *
*                Simulação da Rede                 *
*                Versão 2.00.11                    *
*****

```

Arquivo de Rede: VALIDAÇÃO.net

Tabela de Trecho - Nó:

Trecho: ID	Início: Nó	Fim: Nó	Comprimento m	Diâmetro mm
2	2	3	2	102.3
3	3	4	5	102.3
4	3	5	4	102.3
5	4	7	4	102.3
6	7	6	9	102.3
7	6	5	4	102.3
8	5	9	4	102.3
9	9	10	6	102.3
10	10	8	3	102.3
11	8	4	4	102.3
12	4	23	1	102.3
13	23	24	2	102.3
14	10	11	1	102.3
15	11	12	2	102.3
16	10	13	3	102.3
17	13	14	4	102.3
18	14	15	12	102.3
19	15	16	4	102.3
20	16	17	4	102.3
21	17	18	2	102.3
22	6	19	3	102.3
23	19	20	8	102.3
24	20	9	3	102.3
25	9	21	3	102.3
26	21	22	2	102.3
27	6	17	2	102.3
31	5	N28	1	102.3
32	N28	25	2	102.3
1	1	2	#N/A	#N/A Bomba

Página 2  
Utilização de Energia:

Bomba	Fator	Efic. Utiliz.	kWh Med.	kW /m3	kW Méd.	Custo Máx. /dia
1	100.00	75.00	0.14	14.90	14.90	0.00
Tarifa de Consumo Máximo:						0.00
Custo Total:						0.00

Resultados nos Nós:

Nó	Consumo ID	Carga Hidráulica CMH	Pressão m	Qualidade m
2	0.00	53.00	51.00	0.00
3	0.00	51.56	47.56	0.00
4	0.00	46.78	42.78	0.00
5	0.00	49.89	45.89	0.00
6	0.00	46.78	42.78	0.00
7	0.00	46.78	42.78	0.00
8	0.00	46.78	42.78	0.00
9	0.00	48.23	44.23	0.00
10	0.00	46.34	42.34	0.00
11	0.00	45.62	41.62	0.00
12	108.00	38.61	36.61	0.00
13	0.00	46.78	42.78	0.00
14	0.00	46.78	46.78	0.00
15	0.00	46.78	46.78	0.00
16	0.00	46.78	42.78	0.00
17	0.00	46.78	42.78	0.00
18	0.00	46.78	44.78	0.00
19	0.00	46.78	42.78	0.00
20	0.00	46.78	42.78	0.00
21	0.00	43.15	39.15	0.00
22	0.00	43.15	41.15	0.00
23	0.00	46.78	46.78	0.00
24	0.00	46.78	44.78	0.00
25	0.00	49.89	47.89	0.00
N28	0.00	49.89	45.89	0.00
1	-108.00	15.00	0.00	0.00 RNF

Página 3  
Resultados nos Trechos:

Trecho: ID	Vazão/ CMH	Velocidade/ m/s	Perda de Carga/ m/km	Estado
2	108.00	3.65	721.65	Open
3	0.00	0.00	0.00	Closed
4	108.00	3.65	416.28	Open
5	0.00	0.00	0.00	Open
6	0.00	0.00	0.00	Open
7	0.00	0.00	0.00	Closed
8	108.00	3.65	416.28	Open
9	108.00	3.65	314.49	Open
10	0.00	0.00	0.00	Closed
11	0.00	0.00	0.00	Open
12	0.00	0.00	0.00	Open
13	0.00	0.00	0.00	Open
14	108.00	3.65	721.65	Open
15	108.00	3.65	3503.91	Open
16	0.00	0.00	0.00	Closed
17	0.00	0.00	0.00	Open
18	0.00	0.00	0.00	Open
19	0.00	0.00	0.00	Open
20	0.00	0.00	0.00	Open
21	0.00	0.00	0.00	Open
22	0.00	0.00	0.00	Open
23	0.00	0.00	0.00	Open
24	0.00	0.00	0.00	Closed
25	0.00	0.00	0.00	Closed
26	0.00	0.00	0.00	Open
27	0.00	0.00	0.00	Open
31	0.00	0.00	0.00	Open
32	0.00	0.00	0.00	Open
1	108.00	0.00	-38.00	Open Bomba

## APÊNDICE C: Planilha de cálculo das perdas de carga do estudo de caso (completa)

PERDA DE CARGA DO SISTEMA																		
CRITÉRIO VELOCIDADE						QUANTIDADE DAS CONEXÕES DA LINHA				CRITÉRIO DA PERDA DE CARGA								CUSTO
TRECHO	V (m/s)	Q (m3/h)	DcaIc (mm)	Dad (pol)	epsilon	Curva 90°	"T" de saída lateral	"T" de passagem direta	Registro de gaveta aberto	V (m/s)	Q (m3/h)	Dad (mm)	Lr (m)	ΔP_L (mca)	ΔP (mca)	f	Re	
1-2	2	108	138,19766	6"	0,00003		1			1,6106	108	154	3	0,237987	0,276512	0,014957	247291,8	257,85
2-3	2	108	138,19766	6"		3			1	1,6106	108	154	75	1,679131	2,642250	0,014957	247291,8	6446,25
2-4	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	20	0,237987	0,494819	0,014957	247291,8	1719
4-5	2	108	138,19766	6"		3	1			1,6106	108	154	122	0,594968	2,161642	0,014957	247291,8	10485,9
5-6	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
5-7	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	63	1,560137	2,369158	0,014957	247291,8	5414,85
4-8	2	108	138,19766	6"		1		1		1,6106	108	154	55	0,198323	0,904610	0,014957	247291,8	4727,25
8-9	2	108	138,19766	6"		1		1		1,6106	108	154	31	0,198323	0,596412	0,014957	247291,8	2664,45
8-104	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	171	0,356981	2,552893	0,014957	247291,8	14697,45
104-105	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
104-106	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	162	0,356981	2,437318	0,014957	247291,8	13923,9
106-107	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	8	0,356981	0,459713	0,014957	247291,8	687,6
107-108	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	0,3	1,322150	1,326003	0,014957	247291,8	25,785
107-109	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	68	1,560137	2,433366	0,014957	247291,8	5844,6
106-110	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	57	1,560137	2,292108	0,014957	247291,8	4899,15
9-10	2	108	138,19766	6"		2	1			1,6106	108	154	146	0,475974	2,350846	0,014957	247291,8	12548,7
10-11	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
10-12	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	73	0,237987	1,175423	0,014957	247291,8	6274,35
12-13	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	41	0,356981	0,883486	0,014957	247291,8	3523,95
13-14	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
13-15	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	14	0,237987	0,417769	0,014957	247291,8	1203,3
15-16	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
15-17	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	25	1,441144	1,762184	0,014957	247291,8	2148,75
12-18	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	14	0,237987	0,417769	0,014957	247291,8	1203,3
18-19	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	60	0,237987	1,008482	0,014957	247291,8	5157
19-20	2	108	138,19766	6"		4			1	1,6106	108	154	72	1,798125	2,722719	0,014957	247291,8	6188,4
19-21	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	20	0,237987	0,494819	0,014957	247291,8	1719
21-22	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	27	1,441144	1,787867	0,014957	247291,8	2320,65
21-23	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	21	0,237987	0,507660	0,014957	247291,8	1804,95
23-24	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	45	1,560137	2,138009	0,014957	247291,8	3867,75
23-25	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	63	0,237987	1,047007	0,014957	247291,8	5414,85
25-26	2	108	138,19766	6"		2	1			1,6106	108	154	32	0,475974	0,886905	0,014957	247291,8	2750,4
26-27	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
26-28	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	22	1,441144	1,723659	0,014957	247291,8	1890,9
25-29	2	108	138,19766	6"		3				1,6106	108	154	133	1,679131	3,387063	0,014957	247291,8	11431,35
18-30	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	55	0,237987	0,944275	0,014957	247291,8	4727,25
30-31	2	108	138,19766	6"		2			1	1,6106	108	154	61	1,560137	2,343474	0,014957	247291,8	5242,95
30-32	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	35	0,237987	0,687443	0,014957	247291,8	3008,25
32-33	2	108	138,19766	6"		2	1			1,6106	108	154	93	0,475974	1,670242	0,014957	247291,8	7993,35
33-34	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9

PERDA DE CARGA DO SISTEMA																			
CRITÉRIO VELOCIDADE					QUANTIDADE DAS CONEXÕES DA LINHA					CRITÉRIO DA PERDA DE CARGA							CUSTO		
TRECHO	V (m/s)	Q (m3/h)	Dcalc (mm)	Dad (pol)	epsilon	Curva 90°	"T" de saída lateral	"T" de passagem direta	Registro de gaveta aberto	V (m/s)	Q (m3/h)	Dad (mm)	Lr (m)	ΔP <sub>L</sub> (mca)	ΔP (mca)	f		Re	
36-37	2	108	138,19766	6"		3	1				1,6106	108	154	56	0,594968	1,314097	0,014957	247291,8	4813,2
37-38	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
37-39	2	108	138,19766	6"		1			1		1,6106	108	154	8	1,441144	1,543877	0,014957	247291,8	687,6
36-40	2	108	138,19766	6"		5	1				1,6106	108	154	309	0,832955	4,801006	0,014957	247291,8	26558,55
40-41	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
40-42	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	40	0,237987	0,751651	0,014957	247291,8	3438
42-43	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
42-44	2	108	138,19766	6"		1	1				1,6106	108	154	49	0,356981	0,986219	0,014957	247291,8	4211,55
44-45	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	3	0,237987	0,276512	0,014957	247291,8	257,85
45-46	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
45-47	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	32	0,237987	0,648918	0,014957	247291,8	2750,4
47-48	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
47-49	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	37	0,237987	0,713126	0,014957	247291,8	3180,15
49-50	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
49-51	2	108	138,19766	6"		1	1				1,6106	108	154	52	0,356981	1,024743	0,014957	247291,8	4469,4
51-52	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
51-53	2	108	138,19766	6"		1		1			1,6106	108	154	70	0,198323	1,097234	0,014957	247291,8	6016,5
53-54	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	20	0,237987	0,494819	0,014957	247291,8	1719
54-55	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
54-56	2	108	138,19766	6"						1	1,6106	108	154	37	0,079329	0,554468	0,014957	247291,8	3180,15
56-57	2	108	138,19766	6"		1			1		1,6106	108	154	24	1,441144	1,749342	0,014957	247291,8	2062,8
56-58	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	12	0,237987	0,392086	0,014957	247291,8	1031,4
58-59	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
58-60	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	32	0,237987	0,648918	0,014957	247291,8	2750,4
60-61	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
60-62	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	32	0,237987	0,648918	0,014957	247291,8	2750,4
62-63	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
62-64	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	30	0,237987	0,623235	0,014957	247291,8	2578,5
64-65	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
64-66	2	108	138,19766	6"		1	1				1,6106	108	154	44	0,356981	0,922011	0,014957	247291,8	3781,8
66-67	2	108	138,19766	6"		1			1		1,6106	108	154	6	1,441144	1,518193	0,014957	247291,8	515,7
66-68	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	41	0,237987	0,764492	0,014957	247291,8	3523,95
68-69	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
68-70	2	108	138,19766	6"		2	1				1,6106	108	154	89	0,475974	1,618876	0,014957	247291,8	7649,55
70-71	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
70-72	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	54	0,237987	0,931433	0,014957	247291,8	4641,3
72-73	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
72-74	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	42	0,237987	0,777334	0,014957	247291,8	3609,9
74-75	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
74-76	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	43	0,237987	0,790175	0,014957	247291,8	3695,85
76-77	2	108	138,19766	6"					1		1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
76-78	2	108	138,19766	6"			1				1,6106	108	154	30	0,237987	0,623235	0,014957	247291,8	2578,5

PERDA DE CARGA DO SISTEMA																		
CRITÉRIO VELOCIDADE					QUANTIDADE DAS CONEXÕES DA LINHA					CRITÉRIO DA PERDA DE CARGA							CUSTO	
TRECHO	V (m/s)	Q (m3/h)	Dcalc (mm)	Dad (pol)	epsilon	Curva 90°	"T" de saída lateral	"T" de passagem direta	Registro de gaveta aberto	V (m/s)	Q (m3/h)	Dad (mm)	Lr (m)	ΔP <sub>L</sub> (mca)	ΔP (mca)	f		Re
78-79	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
78-44	2	108	138,19766	6"		2		1		1,6106	108	154	82	0,317316	1,370327	0,014957	247291,8	7047,9
53-80	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	40	0,237987	0,751651	0,014957	247291,8	3438
80-81	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
80-82	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	50	0,237987	0,880067	0,014957	247291,8	4297,5
82-83	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
82-84	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	50	0,237987	0,880067	0,014957	247291,8	4297,5
84-85	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
84-86	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	58	0,237987	0,982799	0,014957	247291,8	4985,1
86-87	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
86-88	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	27	0,237987	0,584710	0,014957	247291,8	2320,65
88-89	2	108	138,19766	6"		1			1	1,6106	108	154	106	1,441144	2,802353	0,014957	247291,8	9110,7
88-90	2	108	138,19766	6"		4	1			1,6106	108	154	68	0,713961	1,587189	0,014957	247291,8	5844,6
90-91	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
90-92	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	30	0,237987	0,623235	0,014957	247291,8	2578,5
92-93	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
92-94	2	108	138,19766	6"		1	1			1,6106	108	154	104	0,356981	1,692506	0,014957	247291,8	8938,8
94-95	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9
94-96	2	108	138,19766	6"			1			1,6106	108	154	96	0,237987	1,470780	0,014957	247291,8	8251,2
96-97	2	108	138,19766	6"					1	1,6106	108	154	2	1,322150	1,347834	0,014957	247291,8	171,9



## ANEXO A: Cotação das bombas consideradas no estudo

<b>Para:</b>	VÓRTICE ENGENHARIA DE PROJETOS S/S	<b>De:</b>	KSB Bombas Hidraulicas S.A. Av. Marechal Mascarenhas de Moraes, 701 - Recife/PE - Brasil
<b>Nome:</b>	José Claudino de Lira Júnior	<b>Nome:</b>	IVENS LEAL Vendedor Técnico
<b>Fax:</b>		<b>Fax:</b>	(81) 3447.0163
<b>Depto:</b>	DIRETOR	<b>Depto:</b>	<b>COMERCIAL - CFR</b>
<b>Tel.:</b>	(81) 3222-3907	<b>Tel.:</b>	(81) 3447.0300
<b>Data:</b>	17/12/12	<b>Num. Pag:</b>	

<b>Sua Referência:</b>	<b>Num. Cotação:</b> <b>Num. Proposta: 212CFR01142-0</b>
------------------------	---

Prezados Senhores

Em atendimento à consulta em epígrafe, temos a satisfação de submeter à sua apreciação nossa proposta correspondente.

Na expectativa de que a presente seja de seu agrado, colocamo-nos à disposição através de nosso Coordenador de Vendas, para quaisquer esclarecimentos que porventura sejam desejados .

Atenciosamente .

ERICH MAZOLLI  
**GERENTE**  
FILIAL RECIFE  
erich.mazolli@ksb.com.br

IVENS LEAL  
**Vendedor Técnico**  
FILIAL RECIFE  
ivens.leal@ksb.ind.br

## MATERIAIS PADRÕES DA KSB BOMBAS

- A48CL30 - MATERIAL FUNDIDO - FERRO FUNDIDO CINZENTO
- A536 60-40-18 - MATERIAL FUNDIDO - FERRO FUNDIDO NODULAR - SIMILAR AO GGG40
- GGG40 - MATERIAL FUNDIDO - NORMA DIN
- A216WCB - MATERIAL FUNDIDO - AÇO CARBONO
- SAE 1045 - MATERIAL LAMINADO - AÇO CARBONO
- A743CF8M - MATERIAL FUNDIDO - INOX AUSTENÍTICO - SIMILAR AO AISI 316
- AISI 316 - MATERIAL LAMINADO - INOX AUSTENÍTICO
- A743CF3M - MATERIAL FUNDIDO - INOX AUSTENÍTICO
- AISI 316L - MATERIAL LAMINADO - INOX AUSTENÍTICO
- G-CUSN10 - MATERIAL FUNDIDO - BRONZE
- SAE40 - MATERIAL LAMINADO - BRONZE
- TM23 - MATERIAL LAMINADO - BRONZE + CHUMBO
- A743CA6MN - MATERIAL FUNDIDO - INOX MATERSITICO - SIMILAR AO AISI 420
- AISI 420 - MATERIAL LAMINADO - INOX MATERSITICO
- ASTM A995CD4MCuN - MATERIAL FUNDIDO - INOX DUPLEX - INOX AUSTENÍTICO / FERRÍTICO USADO PARA CORPOS.
- ASTM A890CD4MCu - MATERIAL FUNDIDO - INOX DUPLEX - INOX AUSTENÍTICO / FERRÍTICO USADO PARA ROTORES E INTERNOS FUNDIDOS.
- DIN 1.4462 - MATERIAL LAMINADO - INOX DUPLEX - INOX AUSTENÍTICO / FERRÍTICO
- ASTM 890CE3MN - MATERIAL FUNDIDO - INOX SUPER DUPLEX
- DIN 1.4462 - MATERIAL LAMINADO - INOX SUPER DUPLEX

## ESCOPO DE FORNECIMENTO



### ***Bomba Centrífuga Horizontal, simples estágio, sucção simples horizontal e descarga vertical, Back-Pull-Out [ Modelo KSB/MEGANORM ]***

- Base em aço estrutural soldado (incluso porcas e chumbadores);
- Luva Elástica sem espaçador - modelo "AE" ;
- Proteção de acoplamento em chapa de aço carbono;
- Vedação do Eixo pôr meio de Gaxeta em fibras de algodão;
- Motor elétrico WEG - W22 PLUS - IPW55 - Isolação F - B3D;
- Serviço de montagem e acoplamento do conjunto moto-bomba sobre a base metálica;
- Plaqueta de identificação da bomba conforme padrão KSB em Alumínio;
- Pintura da bomba padrão KSB (para temperaturas até 90°);
- Pintura do Motor Elétrico padrão WEG 201 (esmalte sintético alquídico) na cor final AZUL RAL 5007;
- Não previstos Desenhos e Documentos Vide Lista de Desenhos e Documentos
- Não previstos Testes Internos e Desacompanhados Vide Plano Controle da Qualidade
- Embalagem para transporte rodoviário;



SAP:

N/Ref.: **212CFR01142-0**

S/Ref.:

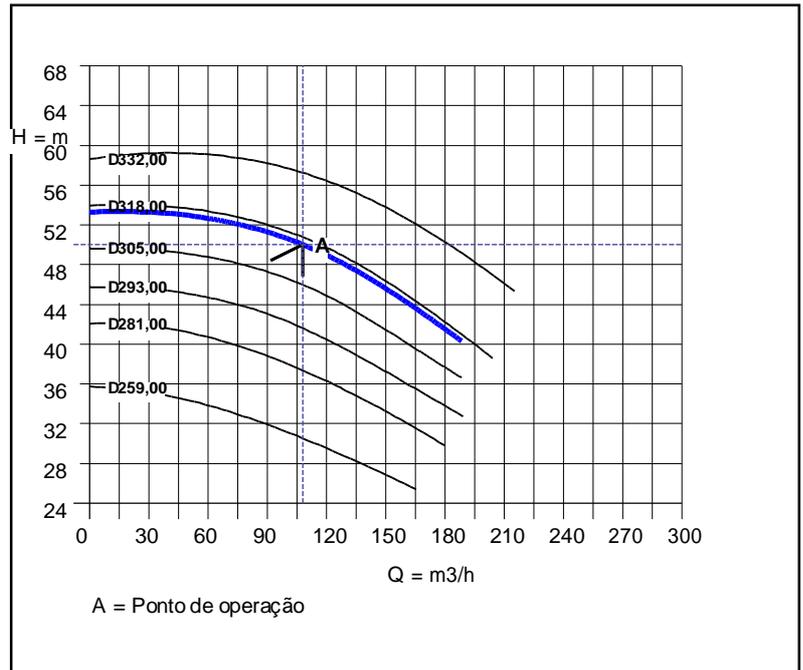
Data: **17/12/12**Item: **1**Quantidade: **1**

Tag:

### Bomba Modelo: MEGANORM 80-315

#### Dados Operacionais:

Vazão : **108,00** m<sup>3</sup>/h  
 Amt : **50,00** m  
 NPSH (Requerido) : **2,60** m  
 Rendimento : **71,00** %  
 Diam. Rotor Projeto : **316,00** mm  
 Líquido Bombeado : **ÁGUA**  
 Temperatura : **25** °C  
 Densidade : **1,000** Kg/dm<sup>3</sup>  
 Velocidade : **1750** rpm  
 Viscosidade : **1,00** cSt  
 Potência Consumida **28,20** CV

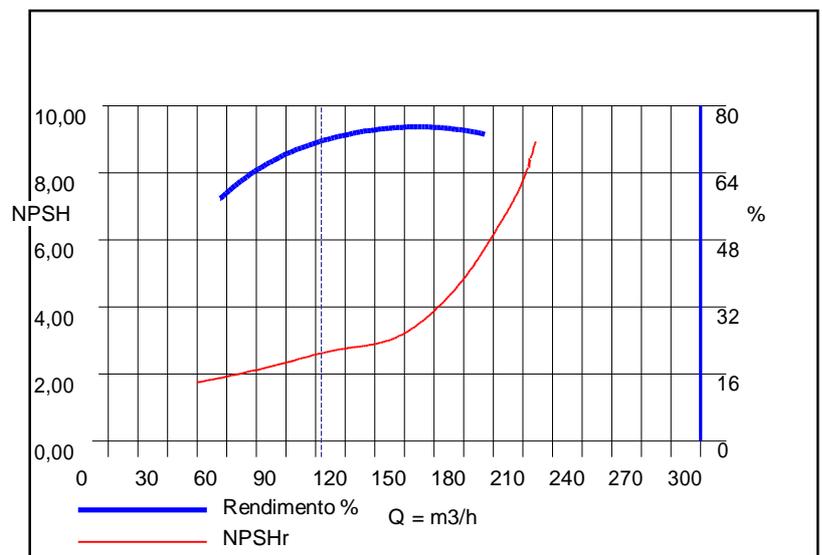


#### Dados Construtivos:

Diam. Sucção : **125mm**  
 Posição : **HORIZONTAL**  
 Classe Pressão : **125# FF**  
 Norma : **ANSI B16.1**  
 Diam. Recalque : **80mm**  
 Posição : **VERTICAL**  
 Classe Pressão : **125# FF**  
 Norma : **ANSI B16.1**  
 Construção : **PÉS**  
 Mancais : **ROLAMENTOS**  
 Lubrificação : **ÓLEO**  
 Rotação(v.l.acion) : **HORÁRIO**  
 Base : **Estrutural**  
 Luva Elástica : **AE128**  
 Motor : **WEG/W22 PLUS**  
**40 HP / IP55 / 200M / 220/760V / Trifásico**  
 Vedação : **Gaxeta**

#### Materiais:

Carcaça : **A48CL30**  
 Rotor : **A48CL30**  
 Eixo : **SAE1045**  
 Luva Protetora Eixo : **A48CL30**  
 Anel de Desgaste : **A48CL30**



#### Escopo de Fornecimento:

Acionador, Base, Bomba, Copo ressupimento, Gaxeta, Luva elastica, Pintura, Protetor  
 Servico conjugacao



SAP:

N/Ref.: **212CFR01142-0**

S/Ref.:

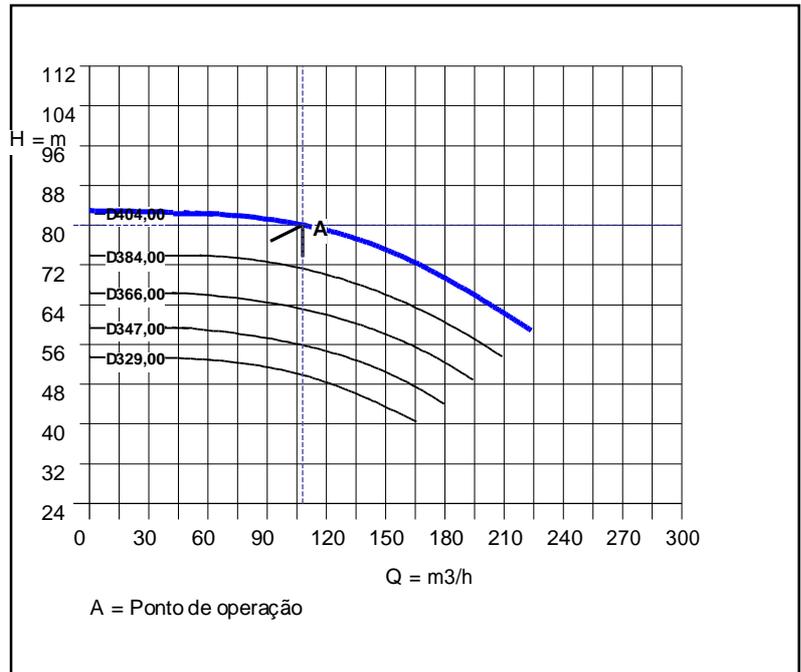
Data: **17/12/12**Item: **2**Quantidade: **2**

Tag:

### Bomba Modelo: MEGANORM 80-400

#### Dados Operacionais:

Vazão : **108,00** m<sup>3</sup>/h  
 Amt : **80,00** m  
 NPSH (Requerido) : **3,00** m  
 Rendimento : **63,00** %  
 Diam. Rotor Projeto : **404,00** mm  
 Líquido Bombeado : **ÁGUA**  
 Temperatura : **25** °C  
 Densidade : **1,000** Kg/dm<sup>3</sup>  
 Velocidade : **1750** rpm  
 Viscosidade : **1,00** cSt  
 Potência Consumida **50,80** CV

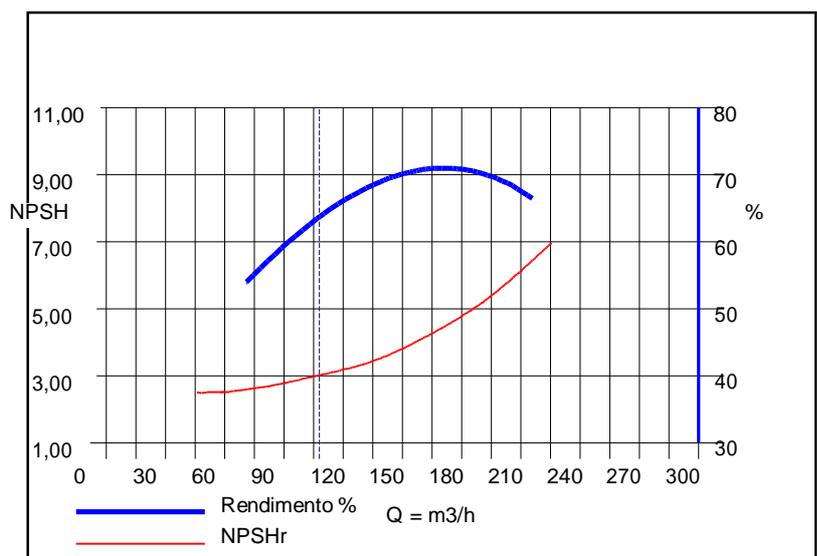


#### Dados Construtivos:

Diam. Sucção : **125mm**  
 Posição : **HORIZONTAL**  
 Classe Pressão : **125# FF**  
 Norma : **ANSI B16.1**  
 Diam. Recalque : **80mm**  
 Posição : **VERTICAL**  
 Classe Pressão : **125# FF**  
 Norma : **ANSI B16.1**  
 Construção : **PÉS**  
 Mancais : **ROLAMENTOS**  
 Lubrificação : **ÓLEO**  
 Rotação (v.l. acion) : **HORÁRIO**  
 Base : **Estrutural**  
 Luva Elástica : **AE168**  
 Motor : **WEG/W22 PLUS**  
**60 HP / IPW55 / 225S/M / 220/760V / Trifásico**  
 Vedação : **Gaxeta**

#### Materiais:

Carcaça : **A48CL30**  
 Rotor : **A48CL30**  
 Eixo : **SAE1045**  
 Luva Protetora Eixo : **A48CL30**  
 Anel de Desgaste : **A48CL30**



#### Escopo de Fornecimento:

Acionador, Base, Bomba, Copo ressupimento, Gaxeta, Luva elastica, Pintura, Protetor  
 Servico conjugacao



SAP:

N/Ref.: **212CFR01142-0**

S/Ref.:

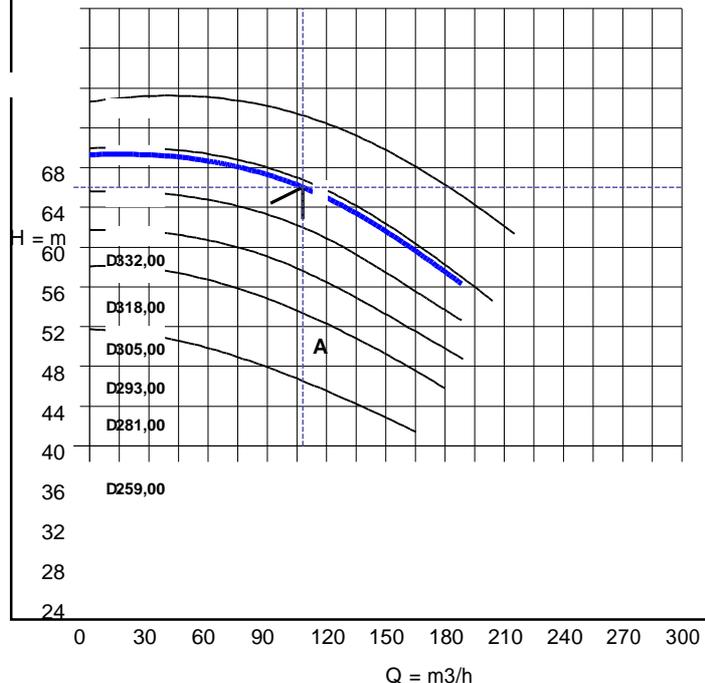
Data: **17/12/12**Item: **3**Quantidade: **2**

Tag:

### Bomba Modelo: MEGANORM 80-315

#### Dados Operacionais:

Vazão : **108,00** m<sup>3</sup>/h  
 Amt : **50,00** m  
 NPSH (Requerido) : **2,60** m  
 Rendimento : **71,00** %  
 Diam. Rotor Projeto : **316,00** mm  
 Líquido Bombeado : **ÁGUA**  
 Temperatura : **25** °C  
 Densidade : **1,000** Kg/dm<sup>3</sup>  
 Velocidade : **1750** rpm  
 Viscosidade : **1,00** cSt  
 Potência Consumida **28,20** CV



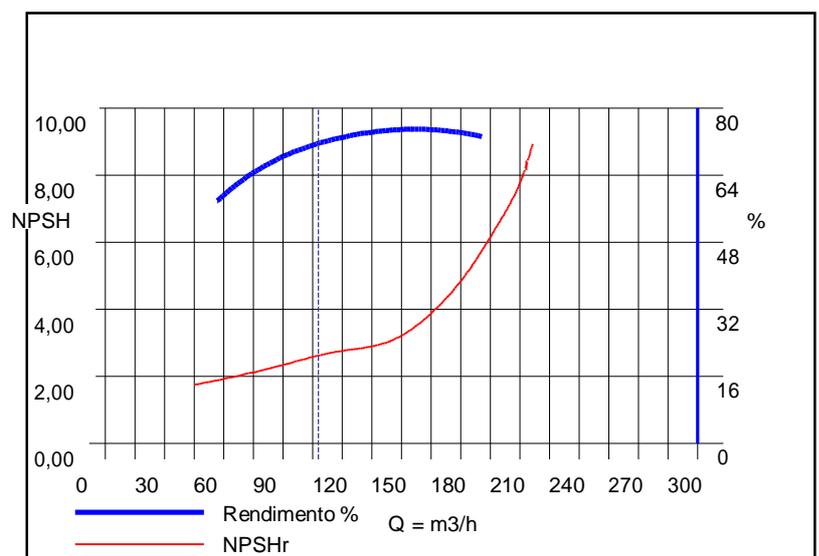
A = Ponto de operação

#### Dados Construtivos:

Diam. Sucção : **125mm**  
 Posição : **HORIZONTAL**  
 Classe Pressão : **125# FF**  
 Norma : **ANSI B16.1**  
 Diam. Recalque : **80mm**  
 Posição : **VERTICAL**  
 Classe Pressão : **125# FF**  
 Norma : **ANSI B16.1**  
 Construção : **PÉS**  
 Mancais : **ROLAMENTOS**  
 Lubrificação : **ÓLEO**  
 Rotação(v.l.acion) : **HORÁRIO**  
 Base : **Estrutural**  
 Luva Elástica : **AE128**  
 Motor : **WEG/W22 PLUS**  
**40 HP / IP55 / 200M / 220/760V / Trifásico**  
 Vedação : **Gaxeta**

#### Materiais:

Carcaça : **A48CL30**  
 Rotor : **A48CL30**  
 Eixo : **SAE1045**  
 Luva Protetora Eixo : **A48CL30**  
 Anel de Desgaste : **A48CL30**



#### Escopo de Fornecimento:

Acionador, Base, Bomba, Copo ressupimento, Gaxeta, Luva elastica, Pintura, Protetor  
 Serviço conjugacao

## COMPLEMENTO COMERCIAL



### 01. PREÇOS

Os preços indicados referem-se aos equipamentos e acessórios descritos em nossa proposta e entendem-se:

**FOB - POSTO SÃO PAULO / SP - FAVOR INFORMAR TRANSPORTADORA EM VOSSO PEDIDO.**

Obs: Em caso de frete CIF, haverá um acréscimo nos valores unitário das bombas, e a contratação do MUNCK para descarrego da mercadoria é de responsabilidade do cliente. Caso este seja necessário.

### 02. CONDIÇÕES DE PAGAMENTO

28ddl

### 03. PRAZO DE ENTREGA

75 dias a contar da data de recebimento do pedido e confirmado pela KSB.

\*\* PRAZO MENOR OU MAIS PRECISO EM NEGOCIAÇÃO JUNTO À FÁBRICA.

### 04. IMPOSTOS - FATURAMENTO POR SÃO PAULO

**ICMS:** Incluso nos preços ofertados, na alíquota atual **7.0%**, conforme legislação em vigor, para válvulas, bombas e/ou conjuntos moto-bombas, com carga tributária de **5.14%**. Para saídas e faturamentos a partir do Estado de São Paulo, a alíquota do ICMS está em conformidade com a "Resolução SF4". Esta oferta contempla o benefício de redução na base de cálculo de ICMS para bombas centrífugas e válvulas, conf. convênio ICMS No 52/91, 45/92, 11/94, 01/00, 10/04, 24/08, 91/08, 138/08 e 69/09 (p/ faturamentos até 31/12/2009).

**IPI: NÃO INCLUSO nos preços ofertados.**

Para bombas, motobombas e válvulas o Decreto nº 6890/2009 de 30/06/2009 estabeleceu a seguinte alíquota:

\* Bombas do tipo Horizontais:

**5% para bombas com vazão igual ou inferior a 18 m³/h.**

**0% para bombas com vazões superiores a 18 m³/h.**

\* Bombas do tipo Submersível (KRT, KRT DRAINER, SUBMERSAS):

**IPI de 5% para todas as bombas desta linha de produto.**

05. ESTAMOS CONSIDERANDO QUE VOSSA EMPRESA SEJA CONTRIBUINTE DE ICMS, OU SEJA, A MESMA POSSUI UMA INSCRIÇÃO ESTADUAL. FAVOR INFORMAR CASO NÃO SEJA!

**CLASSIFICAÇÃO FISCAL:**

Bombas e Conjuntos Moto-Bomba : **84.13.70.90**

Válvulas Borboleta e Retenção : **84.81.80.97**

Parte e Peças : Conforme natureza específica

**NOTA:** Em caso de alteração dos tributos, ora em vigor e/ou criação de novos tributos, procedesse-a automaticamente, pôr ocasião do faturamento, a revisão de preços correspondente.

### 06. EMBALAGEM

Inclusa nos preços ofertados.

### 07. VALIDADE DA PROPOSTA

30dias.

### 08.. ATRASO DE PAGAMENTO

Em caso de atraso de pagamento, os valores a serem pagos corresponderão á:

Juros de mora de 1% (um pôr cento) ao mês, calculados sobre as importâncias em atraso corrigidas mês a mês, desde a data do vencimento até a data do efetivo pagamento.

### 09. DADOS PARA FATURAMENTO

- KSB BOMBAS HIDRÁULICAS S/A

- RUA JOSÉ RABELLO PORTELLA, 638 / BAIRRO : JARDIM BERTIOGA / VÁZEA PAULISTA

- CEP 13220-540
- C.N.P.J: 60.680.873/0001-14
- INSCRIÇÃO ESTADUAL : 712.000.470.118
- INSCRIÇÃO MUNICIPAL: 200037/3
- FONE: (11) 4596-8500

**10. CONTATOS**

**FONE/FAX:** (81) - 3447-0300 / (81) - 34470163 ou (81) - 3447-0471

**EMAIL:** JESSICA NASCIMENTO -

[JESSICA.NASCIMENTO@KSB.IND.BR](mailto:JESSICA.NASCIMENTO@KSB.IND.BR) THIAGO

SANTANA - [THIAGO.SANTANA@KSB.IND.BR](mailto:THIAGO.SANTANA@KSB.IND.BR)